

Multidisciplinarni pristup u rješavanju suvremenih globalnih izazova u fitopatologiji

Pejaković, Lucija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:651744>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

**MULTIDISCIPLINARNI PRISTUP U RJEŠAVANJU
SUVREMENIH GLOBALNIH IZAZOVA U FITOPATOLOGIJI**

DIPLOMSKI RAD

Lucija Pejaković

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

Diplomski studij:

Fitomedicina

**MULTIDISCIPLINARNI PRISTUP U RJEŠAVANJU
SUVREMENIH GLOBALNIH IZAZOVA U FITOPATOLOGIJI**

DIPLOMSKI RAD

Lucija Pejaković

Mentor:

Prof. dr. sc. Edyta Đermić

Zagreb, rujan 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

**IZJAVA STUDENTA
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Lucija Pejaković**, JMBAG 0178118678, rođena 2.5.1998. g. u Sisku, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

**MULTIDISCIPLINARNI PRISTUP U RJEŠAVANJU SUVREMENIH GLOBALNIH
IZAZOVA U FITOPATOLOGIJI**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis studentice

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Lucija Pejaković**, JMBAG 0178118678, naslova

MULTIDISCIPLINARNI PRISTUP U RJEŠAVANJU SUVREMENIH GLOBALNIH

IZAZOVA U FITOPATOLOGIJI

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____, dana _____.

Povjerenstvo:

potpisi:

- | | | | |
|----|---|--------|-------|
| 1. | Prof. dr. sc. Edyta Đermić | mentor | _____ |
| 2. | Izv. prof. dr. sc. Ivana Pajač Živković | član | _____ |
| 3. | Izv. prof. dr. sc. Boris Lazarević | član | _____ |

Zahvala

Ovime zahvaljujem svima koji su pridonijeli završetku moga diplomskog studija Fitomedicina na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Prije nego ostalima, želim se zahvaliti svojoj obitelji i zaručniku na svakoj pomoći i razumijevanju. Uvijek ste mi u životu bili najveći oslonac i najveća podrška. Sve vas jako volim i najveća vam hvala što ste vjerovali u mene. Nadam se da ću vam kroz život nekako vratiti. Osim užoj obitelji, htjela bih zahvaliti i svojim bakama i djedovima. Posebnu zahvalnost dugujem čovjeku koji više nije s nama, svome djedu Mati. Hvala ti za svaku uspomenu i radost koju si mi nesebično pružio tijekom svoga života i za svaku pomoć oko mojeg studiranja.

Nadalje, htjela bih zahvaliti svim svojim kolegicama i kolegama na lijepim uspomenama i trenucima tijekom našeg zajedničkog školovanja. Hvala vam za smijeh, radost i sva naša druženja.

Posebnu zahvalnost dugujem ženi čije je ime na početku ovoga rada, svojoj mentorici prof. dr. sc. Edyti Đermić. Hvala Vam na motivaciji i povjerenju u mene.

Hvala svima!

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Cilj rada	1
2. Utjecaj klimatskih promjena na biljne bolesti i patogene.....	2
2.1. Utjecaj temperature na biljne patogene	4
2.2. Utjecaj suše na biljne patogene.....	5
2.3. Utjecaj ugljikovog dioksida na biljne patogene.....	6
3. Poveznica između fitopatologije i drugih disciplina u poljoprivredi	7
3.1. Upravljanje tlom.....	8
3.2. Fitosanitarne mjere	9
4. Razvoj novih djelatnih tvari	11
4.1. Štetnost kemijskih sredstava za suzbijanje biljnih patogena i problemi u razvoju novih djelatnih tvari	12
5. Nova sredstva za suzbijanje fitopatogena.....	14
5.1. Mikrokapsule.....	14
5.2. Granulirani pripravci	15
5.3. Antibiofilmovi	15
5.4. Nanotehnologija.....	16
5.4.1. Nanopesticidi.....	16
5.4.2. Nanoinkapsulacija - nanonosaci na bazi biopolimera	17
5.4.3. Nanotehnologija u genetičkom inženjeringu	19
6. Management biljnih bolesti.....	20

6.1.	Precizna poljoprivreda.....	20
6.1.1.	Umjetna inteligencija u detekciji/monitoringu.....	21
6.1.2.	Modeli strojnog učenja (ML).....	22
6.1.3.	Modeli dubokog učenja (DL).....	22
6.1.4.	Digitalna fenotipizacija.	23
6.1.5.	Detekcija korištenjem dronova	24
6.1.6.	Molekularno profiliranje	24
6.1.7.	Modeliranje budućih izbijanja bolesti	25
6.1.8.	Druge tehničke inovacije.....	26
6.2.	Procjena/analiza rizika i kriterija odluka	26
6.3.	Biološko suzbijanje	27
6.3.1.	Mikovirusi kao biokontrolni agensi.....	27
7.	Istraživanja holobionta i mikrobioma	28
8.	Klimatski odgovorna poljoprivreda (<i>Climate smart agriculture</i>)	29
9.	Zaključna razmatranja.....	30
	Životopis.....	43

Sažetak

Diplomskog rada studentice **Lucije Pejaković**, naslova

MULTIDISCIPLINARNI PRISTUP U RJEŠAVANJU SUVREMENIH GLOBALNIH IZAZOVA U FITOPATOLOGIJI

Suvremena poljoprivreda danas se suočava s više globalnih problema među kojima je i omogućavanje dostatnih količina hrane za sve brojnije stanovništvo svijeta. Dodatan izazov za poljoprivredu čini problem klimatskih promjena. Zbog promjena u migraciji patogena, dinamici rasta i promjena u staništu uzrokovanih promjenama klime potreban je nov, multidisciplinarni pristup u zaštiti bilja od biljnih patogena. U ovom pregledu posebno se ističu utjecaji klimatskih promjena na biljne bolesti, naročito utjecaj temperature, suše i ugljikovog dioksida na biljne patogene, multidisciplinarne veze između fitopatologije i drugih znanstvenih disciplina, upravljanje tlo i interakcije s fitosanitarnim mjerama, razvoj novih djelatnih tvari u fitomedicini te novi načini suzbijanja biljnih patogena, upravljanje biljnim bolestima, uključujući preciznu poljoprivredu. Obrađuje se također napredak u tehnologijama nadzora i otkrivanja biljnih patogena, u analizi odluka i rizika od bolesti te u biološkom suzbijanju, u istraživanjima holobionta i mikrobioma kao i tzv. pametna poljoprivreda koja uzima u obzir klimu proizvodnog područja. S obzirom na sva navedena područja fitomedicine razmatra se njihov enorman razvoj i ostvaren suvremen napredak tijekom nekoliko desetljeća.

Ključne riječi: klimatske promjene, patogeni, multidisciplinarni pristup, biljna proizvodnja

Summary

Of the master's thesis – student **Lucija Pejaković**, entitled

MULTIDISCIPLINARY APPROACH IN SOLVING CONTEMPORARY GLOBAL CHALLENGES IN PHYTOPATHOLOGY

Modern agriculture today faces several global problems, among which is production of sufficient food quantities for feeding the growing world population. An additional challenge for agriculture is the problem of climate change. Due to changes in pathogens transfer, growth dynamics and habitat changes caused by climate change, a new, multidisciplinary approach is needed to protect plants from plant pathogens. In this review, we highlight the impact of climate change on plant diseases, especially the impact of temperature, drought and carbon dioxide on plant pathogens, multidisciplinary liaisons of plant pathology with other scientific disciplines, soil management and interactions with phytosanitary measures, development of new active compounds in phytomedicine and new plant pathogens control measures, plant disease management, including precision agriculture. Progress in technologies for monitoring and detection of plant pathogens, in decision-making and disease risk analysis as well as in biological control, in holobiont and microbiome research, as well as the so-called smart agriculture that considers the climate of the production area. Regarding all the mentioned areas of plant pathology, their enormous development, modern progress achieved over several decades and future prospects were discussed.

Keywords: climate change, pathogens, multidisciplinary approach, plant protection

1. Uvod

Biljni patogeni jedan su od vodećih uzroka nastanka šteta na usjevima u svijetu. Izazivaju značajne gubitke u području poljoprivrede i gospodarstva u cjelini. Ekonomski važne gubitke prinosa svake godine prije i nakon žetve uzrokuju patogeni kao što su mikrogljive i pseudogljive, bakterije, viroidi, virusi itd. Ovi biljni patogeni vrlo su postojani u uzrokovanju štete pri čemu izravni i neizravni gubici koje uzrokuju iznose oko 40 milijardi dolara diljem svijeta (Jamiołkowska, 2020; Pandit i sur., 2022). Uz povlačenje pojedinih aktivnih tvari za suzbijanje biljnih patogena s tržišta i nedostatnog monitoringa uzročnika bolesti, suvremena fitopatologija nastavlja se suočavati s novim, velikim izazovima kao što su posljedice klimatskih promjena. Klimatske promjene djeluju na sve aspekte poljoprivrede, na okoliš, ali i na njihove međusobne interakcije koje bi mogle dovesti u pitanje dostatnost hrane za rastuće svjetsko stanovništvo. Porast temperature i razine ugljikovog dioksida u atmosferi uzrokuju promjene u razvoju populacija patogena, u interakcijama između domaćina i patogena i pojavu novih patogena širenjem njihovih areala (Singh i sur., 2023). Bolesti biljaka, kako endemske tako i one koje su se nedavno pojavile, šire se i njihov utjecaj jača pod djelovanjem klimatskih promjena, prijenosom patogena putem globalnih mreža trgovine hranom te evolucijom novih linija patogena. Kako bi se suočili s ovim velikim izazovima, potreban je novi set alata koji uključuje nadzor bolesti i poboljšane tehnologije detekcije patogena, uključujući senzore za patogene i prediktivno modeliranje i analizu podataka o njima i biljnim bolestima koje oni uzrokuju kako bi se spriječile buduće epifitocije (Ristiano i sur., 2021).

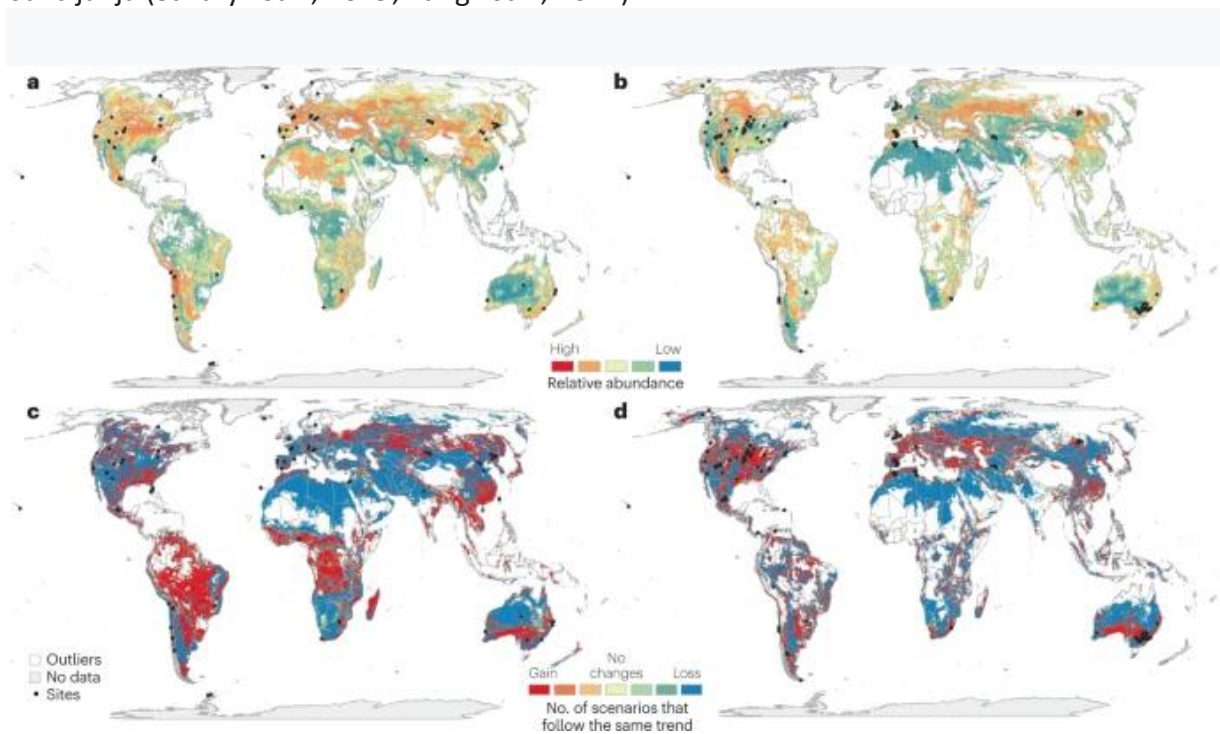
1.1. Cilj rada

Cilj rada je predstaviti suvremene multidisciplinarnе poveznice između fitopatologije i s njom povezanih područja u okviru razvoja novih aktivnih tvari namijenjenih suzbijanju biljnih patogena, precizne poljoprivrede, detekcije i monitoringa patogena, procjene/analize rizika i kriterija odluka, a koje se često, radi uske specijalizacije znanstvenih područja, ne uzimaju u obzir.

2. Utjecaj klimatskih promjena na biljne bolesti i patogene

Klimatske promjene uzrokuju česte poplave, suše, izrazito visoke ili niske temperature koje znatno utječu na poljoprivredu, ponegdje u pogledu prinosa usjeva, a negdje mogu čak i limitirati proizvodnju i dovesti u pitanje uzgoj tradicionalno prisutnih kultura. Klimatske promjene dovode do nižih prinosa, smanjenja površina pogodnih za uzgoj pojedinih kultiviranih biljnih vrsta, povećanog broja štetnih organizama i bolesti, ispiranja hranjivih tvari, smanjene količine organske tvari u tlu i mnogih drugih negativnih utjecaja (European Commission, 2022).

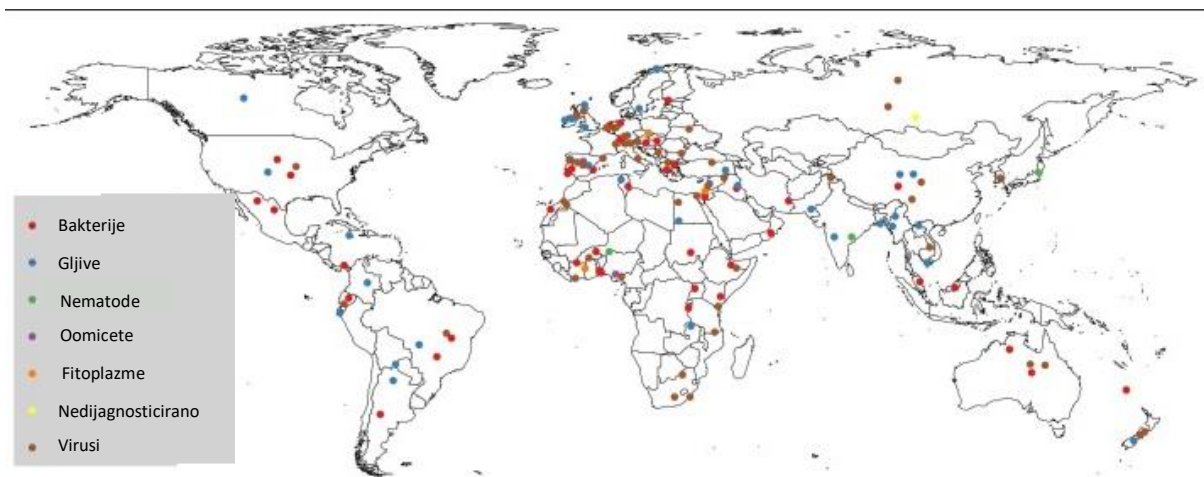
Promjenom klime gotovo svi mjeseci u Republici Hrvatskoj su postali topliji. Prema podacima iz Gospodarskog lista (2018.) zabilježene su epidemijske pojave različitih uzročnika biljnih bolesti u 2014. godini: npr. žute ili crtičave žitne hrđe (*Puccinia striiformis*), krumpirove plijesni i plamenjače rajčice (*Phytophthora infestans*), plamenjače luka (*Peronospora destructor*), krastavosti jabuke (*Venturia ainequalis*), plamenjače i pepelnice vinove loze (*Plasmopara viticola*, *Erysiphe necator*), pjegavosti lista šećerne repe (*Cercospora beticola*) i dr. Biljni patogeni značajno utječu na poljoprivrednu proizvodnju, uzrokujući 13-22% izravnih gubitaka godišnje, uz neizravne troškove nastale pokušajima njihovog suzbijanja (Savary i sur., 2019; Yang i sur., 2022).



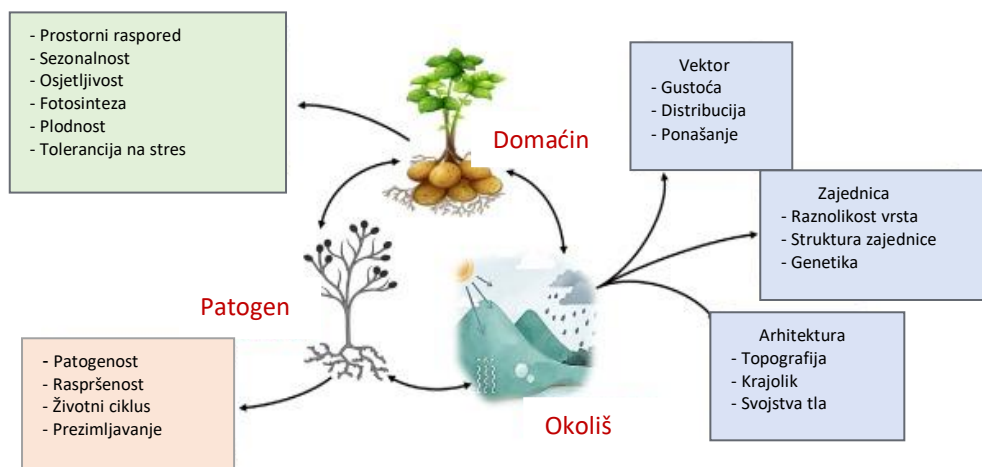
Slika 2.1. Trenutna geografska distribucija i intenzitet pojave biljnih patogena *Phytophthora* spp. i *Pythium* spp. (a) te *Penicillium* spp. (b) koji biljke zaražavaju iz tla. Predviđena promjena u njihovom intenzitetu uz predviđanja promjena klime do 2050. g. (*Phytophthora* spp. i *Pythium* spp. (c); *Penicillium* spp. (d)).
Izvor: <https://www.nature.com/articles/s41579-023-00900-7> - Pristup 20.05.2023.

Klimatske promjene ne utječu samo na funkcionalna svojstva patogena i domaćina pojedinačno, već i na njihove interakcije s demografijom, genetikom, fiziologijom i biologijom drugih vrsta u zajednici, stvarajući tzv. kompromis krajolika patogena i domaćina,

koji može utjecati na cjelokupni epidemiološki proces nastanka i razvoja bolesti (Piao i sur., 2019; Pugnaire i sur., 2019; Juroszek i sur., 2020). Neki modeli predviđaju da bi klimatske promjene mogle intenzivirati pojavu i ozbiljnost budućih zaraznih bolesti biljaka (Slika 2.1.), s većim utjecajem na sjeverna, nego što bi bio utjecaj na južnija područja geografske širine. Taj utjecaj, očekuje se, bit će značajniji na zemlje u razvoju, a manje će ga osjetiti razvijene zemlje (Elad i Petrot, 2014; Altieri i Nicholls, 2017; Bathiany i sur., 2018; Ristaino i sur., 2021). Drugi modeli sugeriraju da klimatske promjene nemaju veći utjecaj na rizik od nastanka epidemija zaraznih biljnih bolesti (epifitocije) ili sukladno njima, promjene klime čak mogu rezultirati manjom učestalošću ili nižim intenzitetom pojedinih biljnih bolesti (Jones i Barbetti, 2012; Chaloner i sur., 2021). Trenutna predviđanja gotovo se isključivo temelje na pretpostavkama da domaćini i patogeni imaju fiksne klimatske preferencije i raspona za rast, reprodukciju, prijenos i kompeticiju (Khatabb i sur., 2019). Od 2015. g. ProMED-mail služba za praćenje zabilježila je 142 izvješća o dolasku novih patogena, uglavnom virusa (37%), bakterija (32%) i gljiva (25%) na nova područja gdje do tada nisu bili detektirani (Raza i Bebbler, 2022.) (Slika 2.2.).



Slika 2.2. Prva izvješća o biljnim patogenima na globalnoj razini između siječnja 2015. i srpnja 2022. g. Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369527422001175?via%3Dihub> Pristup - 20.05.2023.



Slika 2.3. Prikaz složenih utjecaja klimatskih promjena na biljke, patogene, okoliš i interakcije među njima. Izvor: [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(22\)00334-X](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(22)00334-X) - Pristup 20.05.2023.

Prema Beckerman i suradnicima (2023.) pitanja klimatskih promjena, neuspjeha opskrbnog lanca, ratova, političke nestabilnosti i egzotičnih invazivnih vrsta stvorile su još ozbiljnije implikacije za svjetsku sigurnost hrane i vlakana, te stabilnost upravljanih ekosustava, naglašavajući hitnost potrebe za smanjenjem gubitaka koji su povezani s biljnim bolestima.

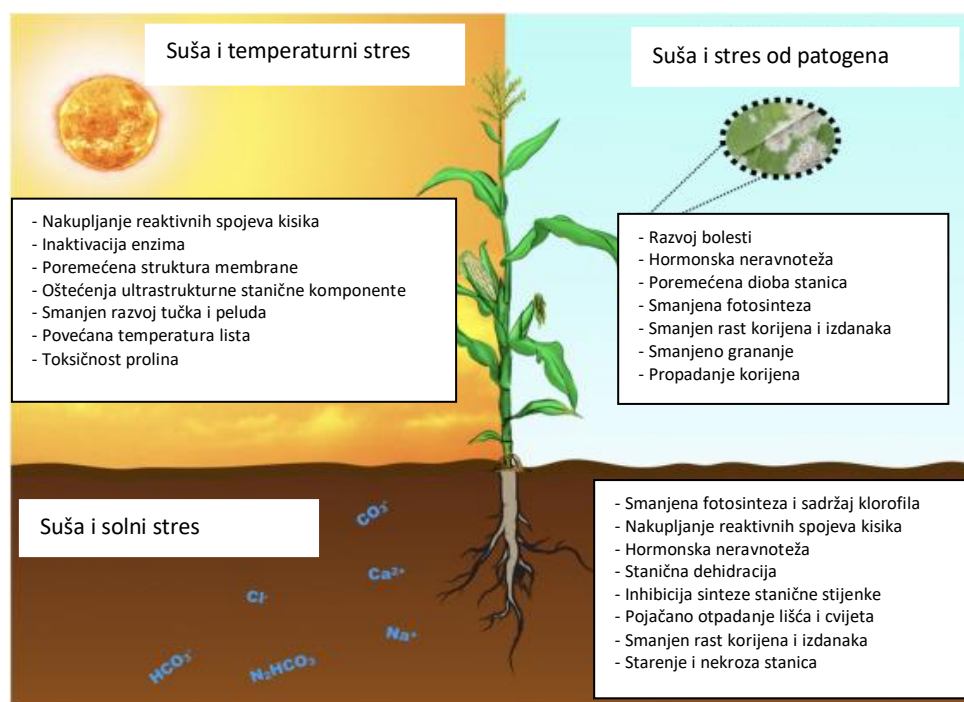
Studije su procijenile učinke nekoliko atmosferskih i klimatskih čimbenika, uključujući povišenu temperaturu, ugljikov dioksid te promjenu raspoložive vode i vlage, na distribuciju, pojavu i brojnost biljnih patogena i ozbiljnost rizika od patogena koji predstavljaju (Slika 2.3.). Povećanjem razine CO₂ i povišene temperature uočen je npr. intenziviranje pojave pepelnice na tikvicama, koncentrične pjegavosti na rukoli, crne pjegavosti i peronospore na bosiljku i pjegavosti lista na repi (Gullino i sur., 2018).

2.1. Utjecaj temperature na biljne patogene

Temperatura je najčešće raspravljani parametar u kontekstu utjecaja promjene klime, a slijede ga voda i ugljikov dioksid (Jurossek i sur., 2020). U određenim područjima, visoka temperatura može biti korisna za usjeve koji tamo obično rastu ili njen porast može dopustiti poljoprivrednicima da prijeđu na sadnju usjeva koji rastu u toplijim područjima. Međutim, to nije uvijek slučaj; ako viša temperatura premašuje optimalne temperature za određeni usjev, prinosi će se smanjiti, ili još gore, može doći do pojave kompatibilnih patogena i bolesti biljaka koje oni uzrokuju (Abdou Zayan, 2020). Učinkovitost fungicida može ovisiti o temperaturi (Greiner i sur., 2019). U najgorem slučaju, učinkovitost fungicida može biti smanjena zbog povišene temperature, bilo izravno ili neizravno zbog povećanog rasta populacija biljnih patogena i/ili pojačanog razvoja otpornosti patogena protiv specifičnog aktivnog fungicidnog spoja (Jurossek i sur., 2020). Visoke temperature mogu rezultirati razvojem novih sojeva patogena koji su prilagođeniji novim uvjetima, a mogu biti i virulentniji (Velasquez i sur., 2018; Newbery i sur., 2016; Cohen i Leach, 2020). Ozbiljnost fuzariozne plamenjače pšenice vjerojatno će se povećati zbog pomaka s blažeg *Fusarium culmorum*, koji preferira hladne i vlažne uvjete, na agresivniji *Fusarium graminearum*, koji preferira tople i vlažne uvjete (Parikka i sur., 2012). Slično tome, novi sojevi vrste *Puccinia striiformis*, agresivniji za domaćina i tolerantniji na povišenu temperaturu, zamijenili su starije sojeve i uzrokuju velika izbijanja pšenične hrđe u SAD-u, Australiji i Europi (Vidal i sur., 2022). Neke eksperimentalne studije i studije modeliranja pokazale su da čak i marginalne promjene temperature (+1 °C) tijekom sezone uzgoja riže dovode do intenziviranja bakterioze metlice i uzrokuju značajne negativne učinke na proizvodnju riže (Shew i sur., 2019; Cohen i Leach, 2020). Uzimajući u obzir najvjerojatniji klimatski scenarij, prosječno povećanje temperature zraka od 2 °C u sljedećih 100 godina, predviđa se da će toksini (npr. aflatoksin), koje proizvode gljive iz roda *Aspergillus* parazitirajući na kukuruzu, postati veliki zdravstveni problem proizvodnje kukuruza u Europi (Battilani i sur., 2016). Janda i suradnici (2019.) ukazuju da kod modelne biljke *Arabidopsis thaliana* visoka temperatura smanjuje ekspresiju imunološkog receptora FLS2, koji potiskuje otpornost biljke na fitopatogenu bakteriju *Pseudomonas syringae*. Istraživanja koja su proveli Fahim i suradnici (2011.) u Egiptu pokazala su kako toplije zimsko vrijeme utječe na učestalost pojave te povećava potrebu za suzbijanjem plamenjače rajčice i krumpira (*Phytophthora infestans*).

2.2. Utjecaj suše na biljne patogene

Suša, koja često prati toplinske valove, i ekstremno povišene temperature smanjile su globalne nacionalne prosjeke proizvodnje žitarica za 9-10% u posljednjih pet desetljeća, a očekuje se da će ti gubici nastaviti rasti (Lesk i sur., 2016). Predviđena sušnija proljeća mogu smanjiti uspješnost ostvarivanja zaraza, a predviđena toplija i suša ljeta mogu spriječiti većinu gljivičnih bolesti (osobito policikličkih mikoza) i konačno usporiti ili potpuno spriječiti sporulaciju i napredovanje bolesti (Juroszek i sur., 2020). To također može rezultirati smanjenim inokulumom za sljedeću sezonu (Boland i sur., 2004). Na primjer, suša može utjecati na otvor puči na listovima biljaka (Mittler, 2006.), a time i na uspješnost zaraze patogena koji se u biljku unose preko lista (Bostock i sur., 2014.), budući da su puči glavna vrata putem kojih mnoge vrste patogena zaražavaju kopnene biljke (Qi i sur., 2018). Općenito, suša usporava ili sprječava razvoj biljnih bolesti uzrokovanih patogenima koji uspijevaju u vlažnim uvjetima. Međutim, nekim bolestima pogoduje suša. To je zato što kada su biljke pod stresom zbog nedostatka vlage ili pretjerane topline, one mogu postati podložnije ovim bolestima. Stres biljaka, kao npr suša, jedan je od čimbenika povećanja učestalosti i ozbiljnosti određenih bolesti. Neki gljivični patogeni, kao što su *Fusarium* i *Rhizoctonia*, ne trebaju puno vode da izazovu truljenje korijena, dok s druge strane, uzročnici truleži korijena slični gljivicama (tzv. pseudogljive kao što su *Phytophthora*, *Aphanomyces* i *Pythium*), trebaju puno vlage u tlu da izazovu zarazu (North Dakota State University, 2020). *Fusarium* vrste uzročnici su značajnih bolesti kukuruza, pšenice i soje. Gljiva *Fusarium verticillioides* može uzrokovati značajne gubitke prinosa i u uvjetima suše mikotoksinima kontaminirati biljno tkivo (Wegulo i sur., 2013). Suša može rezultirati pojavom novih patogena koji mogu izdržati teške uvjete okoliša i iskoristiti promjene u fiziologiji biljaka koje se u njima javljaju kao odgovor na stres (Slika 2.2.1. i 2.3.1.). Na primjer, suša pogoduje infekciji slanutka gljivičnim patogenom suhe truleži korijena *Macrophomina phaseolina* (Rai i sur., 2021).



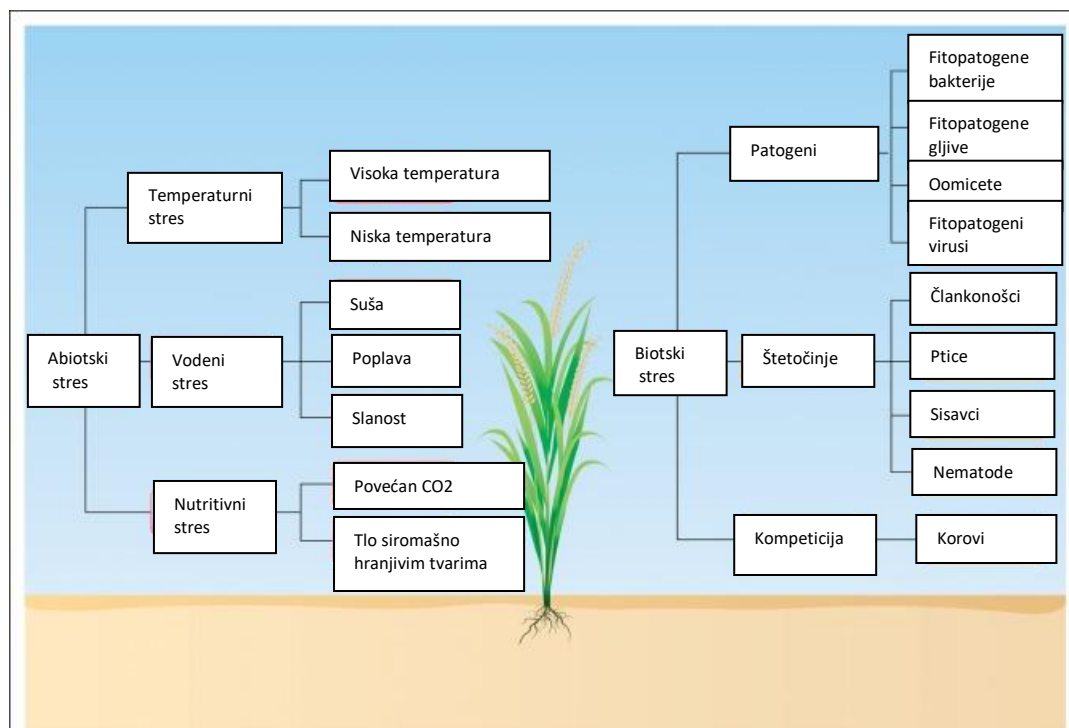
Slika 2.2.1. Različiti abiotički stresovi koji se mogu pojaviti istodobno sa sušom.

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666916121000190> - Pristup 21.05.2023.

2.3. Utjecaj ugljikovog dioksida na biljne patogene

Povećane razine ugljikovog dioksida (CO₂) mogu uzrokovati smanjenje stope promjena i razgradnje biljnih tkiva (simptomi) pod utjecajem patogena, što rezultira višim razinama gljivičnog inokuluma, ukoliko se ovim promjenama potakne proizvodnja više gljivičnih spora. S druge strane, visoke koncentracije CO₂ mogu uzrokovati fiziološke promjene na biljkama, uzrokujući njihovu veću otpornost na određene patogene. Rastuće razine CO₂ u atmosferi izravno utječu na koncentracije proteina i esencijalnih minerala smanjujući njihov sadržaj u raznim biljnim vrstama, uključujući rižu, soju i pšenicu, stoga se učinak porasta CO₂ na hranjivu vrijednost usjeva također smatra mogućom i neizravnom prijetnjom ljudskom zdravlju (Abdou Zayan, 2020). Koncentracija CO₂ u atmosferi mogla bi se povećati s trenutne globalne koncentracije od oko 410 ppm, na više od 800 ppm na kraju 21. stoljeća, ovisno o budućim scenarijima emisije (Juroszek i sur., 2020). Koncentracija CO₂ u atmosferi može izazvati promjene u razinama hormona kod mnogih biljnih vrsta (Noctor i Mhamdi, 2017). Općenito, razine salicilne kiseline, auksina i giberelina rastu u uvjetima povišene koncentracije CO₂, dok se razine abscizinske i jasmonske kiseline smanjuju (Williams i sur., 2018).

Kod rajčice povišene razine CO₂ izazivaju povećanje razine salicilne kiseline i popratno, smanjenje jasmonske kiseline što stvara povećanu otpornost na virus žutog uvijanja lista rajčice (TYLCV), virus mozaika duhana (TMV) i bakterioznu pjegavost (*Pseudomonas syringae*), (to su patogeni koji su obično osjetljivi na obranu biljaka ovisnu o salicilnoj kiselini) i povećanu osjetljivost na gljivu *Botrytis cinerea*, koja je osjetljiva na obranu ovisnu o jasmonskoj kiselini (Zhang i sur., 2015).



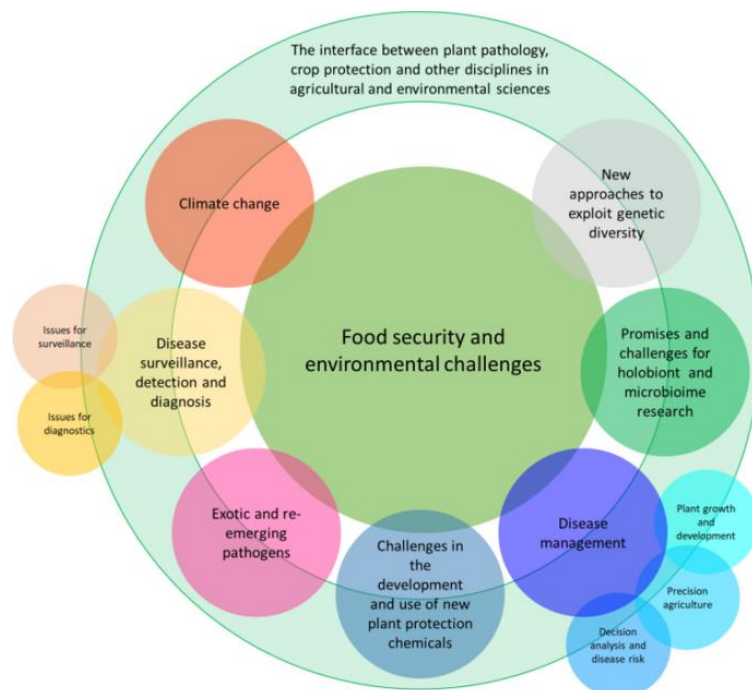
Slika 2.3.1.. Prikaz abiotičkih i biotičkih stresova biljaka.

Stresovi u crvenim okvirima uključuju visoke temperature, sušu, povećani CO₂ i zaraze bakterijskim, gljivičnim i virusnim patogenima, čije se jačanje intenziteta predviđa zbog klimatskih promjena.

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369526620300285> Pristup - 21.05.2023

3. Poveznica između fitopatologije i drugih disciplina u poljoprivredi

Fitopatologija kao zasebna znanstvena disciplina usko je vezana je s drugim disciplinama u poljoprivredi, a koje se također suočavaju s izazovima sigurnosti hrane i upravljanja okolišem (Slika 3.1.). Odavno se zna da su agronomске prakse navodnjavanja, upravljanja tlom i sanitacije ključne komponente u strategijama upravljanja biljnim bolestima poljoprivrednih i povrtlarskih kultura (Jeger, 2005). Upravljanje vlagom u tlu, obrada tla, plodored, sjetvena sezonalnost i sekvence usjeva glavne su uzgojne prakse u zaštiti usjeva koje rezultiraju izbjegavanjem pojave bolesti, redukcijom inokuluma i modifikacijom mikroklima, ali često se one smatraju pojedinačnim praksama, a ne jednom integriranom cjelinom (Jeger i sur., 2021).



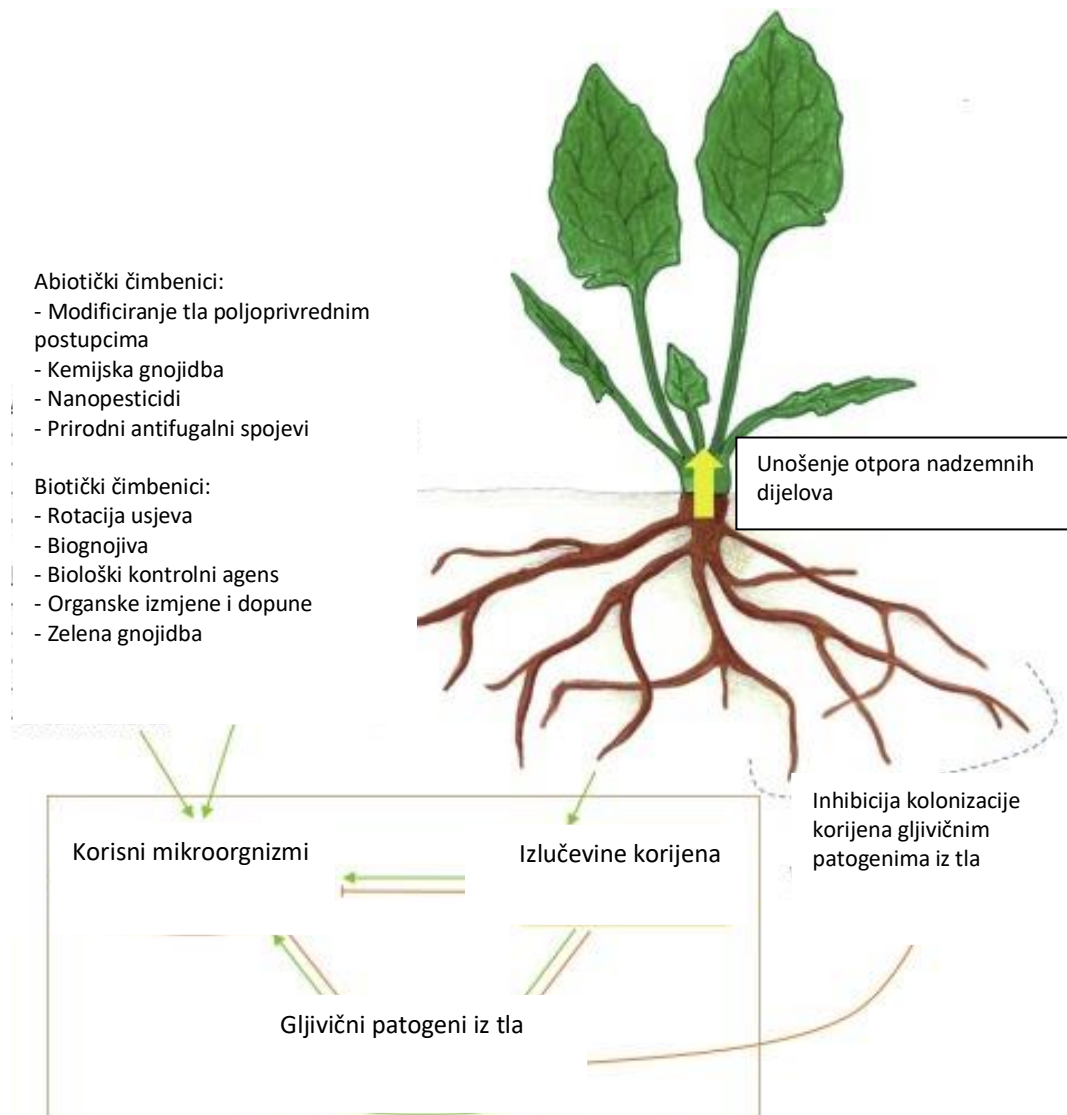
Slika 3.1. Vennov dijagram koji predstavlja multidisciplinarnе izazove s kojima se suočava fitopatologija i s njom usko vezana pitanja, fenomeni, aktivnosti i discipline.

Izvor: <https://cabiagbio.biomedcentral.com/articles/10.1186/s43170-021-00042-x> - Pristup 22.05.2023.

3.1. Upravljanje tlom

Tla koja doprinose suzbijaju biljnih bolesti obuhvaćaju specifične interakcije između biljke, patogena i mikroba i predstavljaju rijedak primjer agroekosustava u kojem uvjeti tla i mikrobiom zajedno sprječavaju da patogen uzrokuje bolest (Sagova-Mareckova i sur., 2023) (Slika 3.1.1.). Zdravlje tla ugroženo je klimatskim promjenama, salinizacijom, erozijom, zbijanjem, iscrpljivanjem hranjivih tvari, kontaminacijom toksičnim teškim metalima i/ili pesticidima, prekomjernom ispašom i antropogeno potpomognutom migracijom štetočinja koje se prenose tlom (Fierer i sur., 2021). Stoga se treba pozabaviti ne samo poboljšanjima kvalitete i plodnosti tla, već i obnavljanjem hranidbene mreže tla, zadržavanjem ugljika u organskoj tvari tla, poboljšanjem kapaciteta zadržavanja vode i smanjenjem izbijanja žarišta štetočinja koje se prenose tlom (Timmis i Ramos 2021). Status mikrobioma je važan jer mnogim modernim sortama biljaka nedostaje genetička otpornost na uobičajene gljivične patogene iz rodova *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Gaeumannomyces*, *Fusarium*, *Verticillium* i *Sclerotinia*, kao i na parazitske nematode poput *Pratylenchus* spp., djelomično zbog dugog ekstenzivnog uzgoja (Cortés i sur., 2022).

Supresivna tla nedavno su se ponovno pojavila kao glavna tema istraživanja zbog stavljanja sve jačeg naglaska na održivu i organsku poljoprivredu, prepoznavanja potrebe za smanjenjem upotrebe sintetičkih pesticida i činjenice da oni omogućuju suzbijanje patogena koji se prenose tlom uz malo ili nimalo unosa (Cha i sur., 2016). Nedavna istraživanja počela su sustavno procjenjivati distribuciju supresivnih tala u kontekstu krajobraza kao što su predložili Raaijmakers i Mazzola (2016.). Na primjer, Ossowicki i suradnici (2020.) su u Nizozemskoj pregledali veliku zbirku poljskih tala na supresiju gljive *Fusarium culmorum* koristeći pšenicu kao model biljke domaćina. Uočili su visoku varijabilnost u supresiji patogenog uzročnika bolesti, s njih 14% koja su pokazala jasan supresivni fenotip. Durán i suradnici (2017) istražili su supresiju gljive *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* u tlima Čilea, Siegel-Hertz i suradnici (2018.) proučavali su tla koja suzbijaju gljivu *Fusarium* na području Francuske, a Tracanna i suradnici (2021) proveli su slična istraživanja o *F. culmorum* koji uzrokuje trulež korijena pšenice u Njemačkoj. Poznato je da monokultura, plodored, obrada, gnojidba, dezinfekcija tla uz dodavanje lako razgradive organske tvari u tlo, zasićenje tla vodom, zatim prekrivanje tla plastičnom folijom i inkubacija na visokoj temperaturi u trajanju 3 do 4 tjedna pomažu pri manipulaciji tlima i managementu biljnih bolesti. Biljne zajednice uzgajane u različitom sklopu također su korištene za ispitivanje potencijala tla za suzbijanje patogena *Rhizoctonia solani*. Rezultati su pokazali da biljne zajednice oblikuju supresiju patogenog inokuluma u tla putem promjena u abiotičkim svojstvima tla (Sagova-Mareckova i sur., 2023). Sve navedene prakse upravljanja tlom korisne su u poboljšanju zdravlja tla, smanjuju učestalost pojave bolesti i posljedično povećavaju prinos i produktivnost usjeva (Thakur i sur., 2022).



Slika 3.1.1. Strategije za povećanje supresivnosti tla spram biljnih patogena i prikaz abiotičkih i biotičkih faktora koji mogu pojačati populaciju mikrobnih antagonista usmjerenih na suzbijanje gljivičnih biljnih patogena
Izvor: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/suppressive-soils> -
Pristup 25.05.2023.

3.2. Fitosanitarne mjere

Patogeni i štetnici koji se prenose sjemenom ili sadnim materijalom ograničavaju proizvodnju u mnogim poljoprivrednim sustavima. Programi karantene pomažu u sprječavanju unošenja egzotičnih patogena u državu, ali malo se propisa izravno primjenjuje na smanjenje ponovnog unošenja i širenja endemskih patogena (Choudhury i sur., 2017). Mnoge zemlje diljem svijeta uspostavile su karantenske i fitosanitarne postupke kako bi smanjile širenje štetoinja koje se prenose sjemenom pregledom uvoznih i izvoznih pošiljaka germplazme (Kumar i sur., 2021). Međunarodni prijenos sjemena prepoznat je kao važan put za prekogranični transfer štetoinja koji je u direktnoj vezi s raznolikim aktivnostima ljudi, ne samo s onima u kojima se službeno distribuira sjemenski materijal kultiviranih biljnih vrsta (Elmer, 2001). Prijetnja može postati ozbiljna ako se unesu virulentniji sojevi ili rase pojedinih

patogena (Miew i Misra, 1994). Čak i štetočinje s niskom stopom prijenosa sjemenom, posebice virusi, mogu dovesti do epifitotičnog razvoja bolesti u polju, ako su uvjeti (npr. pojava insekata vektora i osjetljivih domaćina) i klima povoljni (Bebber i sur., 2014). Prema Carvajal-Yepes i suradnicima (2019.) te Giovani i suradnicima (2020.), fitosanitarno uvozno zakonodavstvo prva je linija obrane u bilo kakvoj prevenciji međunarodnog širenja biljnih bolesti. Cilj fitosanitarnog regulatornog sustava za uvoz je spriječiti ili ograničiti unošenje reguliranih štetnih organizama putem uvezene robe i drugim reguliranim artiklima i putnicima (IPPC Secretariat, 2021). Fitosanitarni regulatorni sustav uvoza obično se sastoji od dvije komponente: regulatornog okvira fitosanitarnog zakonodavstva, propisa i postupaka; i formalne službe, nacionalne organizacija za zaštitu bilja (NPPO), odgovorne za rad ili nadzor sustava (ISPM 20, 2019). U odnosu na uvoz to uključuje nadzor odn. inspekciju (ali nije ograničeno samo na njega), analizu rizika unosa štetočinja (eng. *pest risk analysis*, PRA) te obuku i razvoj osoblja (IPPC Secretariat, 2021).

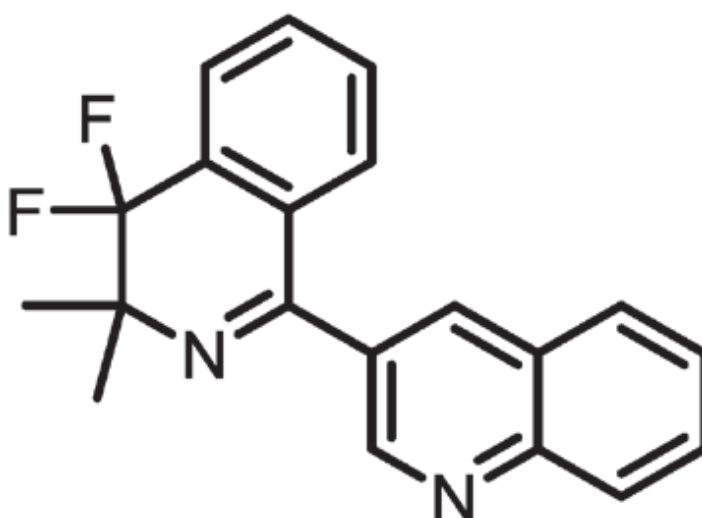
Kako bi fitosanitarni regulatorni sustav uvoza ostao učinkovit u situaciji klimatskih promjena, bit će ključno imati dobre sposobnosti procjene rizika i upotrijebiti ih za procjenu mogućih scenarija rizika, uzimajući u obzir klimatske promjene. Provedba funkcionalnih i dobro organiziranih aktivnosti nadzora i praćenja također će biti vrlo značajna (IPPC Secretariat, 2021). Formalne službe morat će realnu fitomedicinsku situaciju nadzirati sa sve većom budnošću kako bi odmah otkrile nova unošenja (uključujući one koje se uspostavljaju zbog promjene klimatskih parametara) i promjene statusa štetočinja što je preduvjet da bi mogle brzo i uspješno reagirati (Carvajal-Yepes i sur., 2019; Giovani i sur., 2020).

Najbolje dostupne prakse za suzbijanje štetnika uključuju između ostalog proizvodnju čistog sjemena i sadnog materijala, sustave ranog upozoravanja na pojavu bolesti, dobre dijagnostičke alate i učinkovite tretmane, kao što su obrada sjemena (Munkvold i Gullino, 2020.), zajedno s pripadajućim uzorkovanjem i praćenjem (IPPC Secretariat, 2021). Druge najbolje dostupne prakse uključuju korištenje otpornih kultivara biljaka kada su takvi dostupni, usvajanje kulturnih praksi koje promiču zdravlje biljaka, implementaciju integrirane sustave za suzbijanje štetočinja, primjenu rigoroznih higijenskih mjera i upotrebu bioloških proizvoda za zaštitu usjeva (IPPC Secretariat, 2021). Značaj navedenih praksi postat će još veći zbog klimatskih promjena kod sve većih i promjenjivih prijetnji od štetnika, te će ih biti potrebno djelomično prilagoditi kako bi se održala njihova učinkovitost.

4. Razvoj novih djelatnih tvari

Djelatne tj. aktivne tvari osnovni su sastojci sredstava za zaštitu bilja čija je uloga unutar pripravka za zaštitu bilja uništiti, odvratiti ili kontrolirati pojedini štetni organizam. Osim pojave rezistentnosti štetnih organizama na aktivne tvari, današnji fitopatolozi suočavaju se sa njihovim povlačenjem sa tržišta zbog njihovog ekološkog otiska. U posljednjih nekoliko desetljeća mnoge su aktivne tvari strogo regulirane i opstale su u vrlo ograničenoj upotrebi ili su u potpunosti zabranjene radi negativnog utjecaja na okoliš, preciznije na kakvoću zraka, vode i/ili tla, te radi negativnog utjecaja na zdravlje ljudi, životinja i biljaka. Prema podacima Ministarstva poljoprivrede Republike Hrvatske, u periodu od 2020. godine povučeno je desetak aktivnih tvari za zaštitu od biljnih patogena. Redom su to: tiofanat-metil i epoksikonazol (2020.), ciprokonazol, mankozeb, famoksadon, prokloraz, flutriafol, fenbukonazol, miklobutanal (2021.), izopirazam (2022.). U okviru donesenog europskog Zelenog plana, a posebno njegove strategije „Od polja do stola“ i strategije za bioraznolikost, planirane su mjere za smanjenje upotrebe kemijskih fungicida za 50% do 2030. godine. Međutim, osim njihovih negativnih strana, fungicidi su uvijek igrali veliku ulogu u zaštiti usjeva, uspješno smanjujući gubitke u prinosu.

Usprkos značajnim istraživačkim naporima, vrlo malo novih djelatnih stiže na tržište. Istraživanja provedena od strane Ito i suradnika (2023.) govore o novom fungicidu, kinofumelinu (Slika 4.1.), razvijenom od strane Mitsui Chemicals Agro, Inc. (Tokio, Japan). Ista tvrtka je 2019. godine razvila tolprokarb, novi fungicid protiv oomiceta koji se pokazao učinkovitim ne samo kod plamenjače riže, već i kod drugih bakterioznih bolesti (Hagiwara i sur., 2019). Kinofumelin je pokazao preventivno i kurativno djelovanje protiv plamenjače riže i sive plijesni. Nadalje, kinofumelin nije dovodio do unakrsne rezistentnosti u odnosu s postojećim fungicidima (Ito i sur., 2023).



Slika 4.1. Struktura molekule kinofumelina.

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-quinofumelin_fig2_365484752

- Pristup 28.05.2023.

4.1. Štetnost kemijskih sredstava za suzbijanje biljnih patogena i problemi u razvoju novih djelatnih tvari

Primjena konvencionalnih agrokemikalija za zaštitu bilja i dalje je dominantna metoda suzbijanja mnogih biljnih patogena diljem svijeta, posebice fitopatogenih gljiva. Uz pozitivne učinke pesticida, kao što je zaštita usjeva, što u konačnici rezultira dobrim urodom, postoje i negativni učinci pojedinih sredstava za zaštitu bilja na okoliš i zdravlje ljudi, životinja i biljaka.

Agrokemikalije koje se primjenjuju u poljoprivredi imaju raznolike uloge, kao što su ispunjavanje potreba biljaka za hranjivim tvarima u tlu, zaustavljanje rasta fitopatogena ili njihovo iskorjenjivanje. Stalna primjena hranjiva i/ili pesticida na poljoprivrednom zemljištu utječe na njegovu teksturu, produktivnost biljke i tla, na izvornu mikrofloru tla i kompletan okoliš. Nakon primjene pesticida na voću, povrću i usjevima, određena količina tih pesticida taloži se na i u različitim dijelovima voćaka i drugih usjeva kao kemijski ostaci tj. rezidue. Konzumacija velikih količina ostataka pesticida donosi mutagene, kancerogene, citotoksične i genotoksične efekte, te niz zdravstvenih problema kod ljudi (Singh i sur., 2020).

Nedavno se pojavila zabrinutost zbog neizravnih učinaka neonikotinoidnih pesticida koji se primjenjuju kao tretman sjemena širokog spektra, s djelovanjem i na korisne kukce, pa i na pčele (Jeger i sur., 2021). Piretroidi i imidazolski fungicidi te neonikotinoidni insekticidi štetni su za medonosne pčele. Od 2006. godine zabilježen je pad u globalnoj populaciji medonosnih pčela od 29-36% godišnje (Mahmood i sur., 2016). Oprašivanje kukcima jedna je od najvažnijih usluga ekosustava, te više od 75% svih usjeva oprašuju kukci (Potts i sur., 2010). Ekonomska vrijednost oprašivanja kukcima samo u Europi i SAD-u procjenjuje se na nekoliko stotina milijardi dolara godišnje (Gallai i sur., 2009). Uz klimatske promjene, gubitak staništa temeljem intenziviranja poljoprivrede i invazivnih vrsta i različite zdravstvene probleme samih pčelinjih zajednica, glavni čimbenik pada njihovih populacija je intenzivna uporaba agrokemijskih sredstava za zaštitu bilja (Goulson i sur., 2015). Nadolazeća kriza oprašivanja potaknula je opću raspravu o sigurnosti sredstava za zaštitu bilja kao i intenzivne studije o neželjenim nuspojavama agrokemikalija na korisne kukce (Holden, 2006).

Gubitak bioraznolikosti tla također se naširoko pripisuje pretjeranoj upotrebi kemijskih mjera zaštite provedenoj na poljoprivrednim površinama (Devi i sur., 2022). Dokazano je da pesticidi također mijenjaju aktivnost enzima tla i ometaju metabolizam mikroba. Fungicidi imaju veći utjecaj na biotu tla nego herbicidi ili insekticidi.

Različite države nastoje osigurati realizaciju upotrebe agrokemikalija temeljenu na znanstvenim činjenicama kroz različite pristupe. To uključuje pravne, tržišne i obrazovne intervencije. Regulatorna državna tijela odobravaju agrokemikalije koje se smatraju podnošljivima ili nepostojanima pri preporučenom opsegu primjene u smislu definiranih koncentracija i doza (Zikankuba i sur., 2019). Troškovi razvoja novih pesticida su visoki, a regulatorne prepreke stroge. Postoje i drugi problemi koji se javljaju među postojećim i novim proizvodima za suzbijanje biljnih patogena, uključujući gubitak učinkovitosti djelatnih tvari zbog toga što patogen razvija otpornost na sredstva s kojima opetovano dolazi u kontakt (Jeger i sur., 2021). Stoga otpornost na fungicide i potreba za upravljanjem

postojećim kemikalijama postaje složena i izazovna (Brent i Holloman 2007). Trenutno je više od 1200 agrokemikalija registrirano i u upotrebi diljem svijeta, uključujući i one koje su ukinute u pojedinim regijama (Turner, 2018). U današnje vrijeme nova agrokemikalija namijenjena suzbijanju štetočinja ne može biti odobrena osim ako su poznati njezini učinci na zrak, vodu, tlo i zdravlje ljudi (Vaz, 2019).

5. Nova sredstva za suzbijanje fitopatogena

Radi dokazanih štetnih utjecaja pojedinih aktivnih tvari namijenjenih suzbijanju biljnih patogena od neizmjerne je važnosti dizajniranje novih fungicida ili pristupa formuliranju. To se može postići razvojem novih materijala, kao što su formulacije mikrokapsula (MC), granula, hidrogelova, novih premaza, nano-omogućenih sustava koji sadrže aktivne sastojke i kontroliraju njihovo otpuštanje (Tleuova i sur., 2020).

5.1. Mikrokapsule

Mikroinkapsulacija je proces u kojem su sićušne čestice ili kapljice okružene premazom (ovojnicom) kako bi se dobile male kapsule s korisnim svojstvima (Amaral i sur., 2018). Jedan često korišten biopolimer za mikroinkapsulaciju je alginat (ALG), biopolimer ekstrahiran iz morskih algi (npr. *Macrocystis pyrifera*, *Ascophyllum nodosum* i *Sargassum sinicola*) i nekih bakterijskih vrsta (npr. *Pseudomonas* i *Azotobacter*). Nedavni napredak rezultirao je proizvodnjom mikrokapsula na bazi alginata koje zadovoljavaju ključne zahtjeve bakterijske inkapsulacije, uključujući biokompatibilnost, biorazgradivost i podršku dugoročnom preživljavanju i funkcioniranju (Riseh i sur., 2021). Jedna od osnovnih upotreba ALG-a je zarobljavanje rizobakterija koje potiču rast biljaka (engl. *plant growth promoting rhizobacteria*, PGPR) u mikrokapsule kako bi se poboljšali uvjeti za preživljavanje ovih važnih bakterijskih vrsta (Kim i sur., 2012). Tijekom proteklih nekoliko godina, rizobakterije dobivaju sve više pažnje među mnogim istraživačima u agronomiji zahvaljujući njihovoj velikoj učinkovitosti u stimulaciji rasta, a bile su uspješne i u stvaranju otpornosti biljaka na patogene (Pusey i sur., 2011).

Mnogi su istraživači tvrdili da inkapsulacija bakterijskih sredstava na bazi algina ima velik potencijal za biološko suzbijanje biljnih patogena. Kim i sur. (2011.) istraživali su ALG inkapsulaciju i biokontrolni bakterijski agens *Pantoea agglomerans* soj E325 u postupnom oslobađanju protiv vrste *Erwinia amylovora* na jabuci. Ovo istraživanje potvrdilo je uspješnu primjenu inkapsuliranog biokontrolnog bakterijskog agensa *P. agglomerans* E325, protiv *E. amylovora*, te se koristi kao učinkovita strategija za suzbijanje šteta od ove biljne bolesti. Pour i suradnici (2019.) izvijestili su da algin/želatinske mikrokapsule s bakterijom *Pseudomonas fluorescens* povećavaju stopu rasta biljaka krumpira i značajno smanjuju bolest suhe truleži krumpira. Tui i suradnici ukazuju da algin/želatinske mikrokapsule u kojima se nalazi *Bacillus subtilis* SL-13 mogu poslužiti kao novi mikrobnii fungicid. Wiwattanapatapee i suradnici (2013.) izvještavaju da *Bacillus megaterium* inkapsuliran u mikrokapsulama kalcijevog alginata pokazuje učinkovitost protiv plamenjače na riži. Prema istraživanjima koje su proveli Abdelraouf i suradnici (2023.) *Pseudomonas fluorescens* inkapsuliran u nano-kitozan uspješno ublažava infekciju *Fusarium oxysporum*.

Poznato je da mikroinkapsulacija može poboljšati održivost i stabilnost bioloških sredstava za suzbijanje biljnih patogena i bezopasna je za okoliš (Ma i sur., 2015). Pokazala se učinkovitim i uspješnim alatom u borbi protiv biljnih patogena u svijetu. Navedena metoda još uvijek je u nastajanju, međutim, ima značajan potencijal, jer bi se na taj način moglo omogućiti obogaćivanje raznih prehrambenih proizvoda s prirodnim antioksidansima i drugim bioaktivnim spojevima (Belščak-Cvitanović i sur., 2011), a uz to zaštititi usjev od biljnih

patogena. Spomenuti fenomen testiran je na raznim kultiviranim biljkama (npr. salata, rajčica, vinova loza) pri čemu se unutar mikrokapsula kombiniralo mikrohranjiva (npr. željezo), biološki agens koji ima ulogu stimulatora biljnog rasta i biološkog sredstva za suzbijanje biljnih patogena (npr. iz roda *Trichoderma*) te tradicionalna kemijska sredstva za suzbijanje biljnih patogena (npr. bakar) (Vinceković i sur., 2016. i 2019.).

5.2. Granulirani pripravci

Ghoneem i suradnici (2019.) nedavno su proveli istraživanje kako bi procijenili učinkovitost granuliranog bioaktivnog pripravka *Trichoderma viride* (GBTV) i arbuskularnih mikoriznih gljiva (AM) u biološkom suzbijanju bolesti kima uzrokovanu gljivom *Fusarium oxysporum*. U uvjetima staklenika, upotreba formulacije AM+GBTV smanjila je učestalost zaraze *F. oxysporum* i povećala postotak preživljavanja biljaka. Biokemijski parametri zaraženih biljaka s AM ili tretiranjem GBTV-om pokazali su značajno povećanje sadržaja ukupnih fenola, aktivnosti peroksidaze i polifenoloksidaze u biljci. U poljskim uvjetima, tretiranje AM zajedno sa GBTV-om značajno je smanjilo učestalost simptoma venuća i povećalo preživljavanje biljaka, jednako kao i kemijski fungicid.

5.3. Antibiofilmovi

Postaje sve očiglednije da fitopatogeni ne stupaju u interakciju s biljkom kao pojedinačni entiteti, već na razini populacija, u kojima mikroorganizmi žive i imaju složeno ponašanje kao odgovor na površinu na kojima se nalaze, na druge organizme i na izvanstanični okoliš (Villa i sur., 2017). Drugim riječima, mnogi biljni patogeni stvaraju tzv. biofilm. Važna obilježja zaraze temeljene na postojanju biofilma patogena su povećana otpornost patogena koji se nalaze unutar biofilma na konvencionalne biocide i njihova sposobnost izbjegavanja obrambenih mehanizama domaćina (Ramage i sur., 2012; Balcázar i sur., 2015).

Koncept biofilma u fitopatogenih mikroorganizama nudi priliku za iskorištavanje novih ekološki prihvatljivih poljoprivrednih praksi (Villa i sur., 2017). Potencijal spojeva koji mogu narušiti biofilm (tzv. spojevi s antibiofilm djelovanjem) u subletalnim koncentracijama dokazan je protiv fitopatogenih bakterija, pokazujući u određenoj mjeri izvedivost predložene antimikrobne strategije temeljene na onesposobljavanju biofilma. Nedavna studija pokazala je da salicilna kiselina smanjuje stvaranje biofilma, pokretljivost plivanja i proizvodnju acil homoserin laktona različitim biljnim patogenima (npr. *Erwinia amylovora*, *Pseudomonas corrugata*, *P. syringae* pv. *syringae*, *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* i *Pectobacterium carotovorum*) (Lagonenko i sur., 2013). D-leucin i 3-indoloacetonitril, za koje se pokazalo da inhibiraju stvaranje biofilma i virulentnost kod ljudskih bakterijskih patogena, učinkovito su spriječili stvaranje biofilma uzročnika raka citrusa *X. citri* subsp. *citri* (Villa i sur., 2017). Spojevi su bili učinkoviti u antibiofilm djelovanju na različitim abiotičkim površinama

kao i na površini listova citrusa već u subinhibicijskim koncentracijama, potiskivanjem ekspresije gena fitopatogena povezanih s kemotaksijom/pokretljivošću (Li i Wang, 2014.).

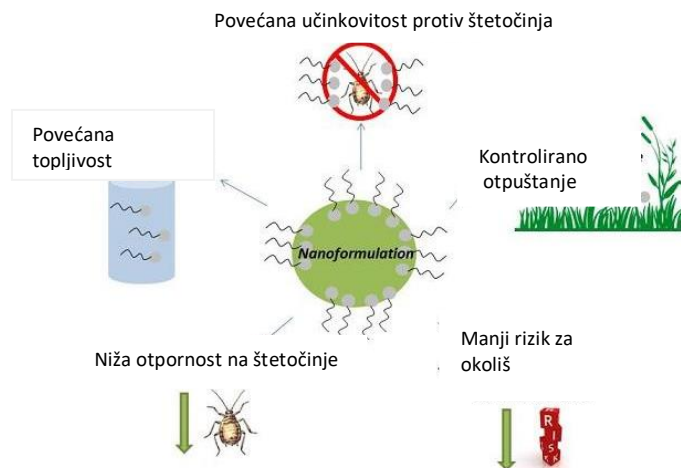
5.4. Nanotehnologija

Istraživanje primjene nanotehnologije za korištenje u poljoprivredi postalo je sve popularnije tijekom prošlog desetljeća (Kah i Hofmann, 2014). Različite vrste nanoalata kao što su nanomaterijali, nanoformulacije, nanokompoziti, nanoemulzije i poljoprivredni alati temeljeni na nanoenkapsulaciji korišteni su za osiguravanje prehrane biljkama i otrova za štetočinke kroz njihovu primjenu na kontrolirani način (Chhipa, 2019).

5.4.1. Nanopesticiidi

Pesticidi proizvedeni nanotehnologijom (tzv. nanopesticiidi) imaju veliku površinu i sposobni su za preciznu isporuku kao odgovor na okolišne okidače kao što su temperatura, kiselost, vlažnost, enzimi i svjetlost (Slika 5.4.1.1.; Bingna i sur., 2018), što može definirati njihovu topljivost u vodi, čime se minimiziraju ostaci djelatnih antimikrobnih tvari u okolišu (Zhao i sur., 2018.).

Rani pokusi s krutim nanočesticama koje se sastoje od metalnih oksida, sumpora i silicija pokazali su se uspješnima u kontroli niza štetnika (Goswami i sur., 2010.). U usporedbi s tradicionalnim formulacijama, nanopesticiidi imaju vrhunsku antimikrobnu učinkovitost i ekološki su prihvatljivi. Metalne nanočestice poput srebra (Ag), bakra (Cu), cinkovog oksida (ZnO) i titanovog oksida (TiO) koriste se za suzbijanje patogena kao što su *Alternaria aleternata*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Macrophomina phaseolina* itd. (Lamsal i sur., 2011.). Istraživanja koja su proveli Zhao i suradnici 2022. godine govore kako nanočestice na bazi cinka (Zn) pokazuju svoj potencijal i imaju snažno antimikrobno djelovanje. Raj i suradnici 2021. godine otkrivaju kako nanočestice cinkovog oksida imaju sposobnost blokiranja *Fusarium graminearum*, *Penicillium expansum*, *A. alternata*, *F. oxysporum*, *Rhizopus stolonifer*, *Mucor plumbeus* i *Aspergillus flavus*, kao i uzročnika bolesti ljudi i životinja *Pseudomonas aeruginosa*, dok nanočestice bakra djeluju učinkovitije na *Phytophthora infestans*, nanočestice molibdena ograničavaju rast gljivičnih konidiofora i konidija što uništava vegetativnu strukturu gljiva. Nanočestice srebra remete funkciju stanične membrane patogena, sprječavaju aktivnost H⁺ ATPaze i blokiraju protok hranjivih tvari (Sompura i sur., 2023).



Slika 5.4.1.1. Djelovanje nanopesticida.

Izvor: <https://www.openpr.com/news/2067808/nanopesticide-market-growth-and-status-explored-in-a-new> - Pristup 02.06.2023.

Nanočestice igraju značajnu ulogu u kontroli biljnih bolesti svojim antifungalnim, antivirusnim i antibakterijskim svojstvima. U budućnosti će biti alternativa fungicidima, insekticidima i herbicidima i vjerojatno postati održivi alat u poljoprivredi za management biljnih bolesti (Sompura i sur., 2023).

5.4.2. Nanoenkapsulacija - nanonosaci na bazi biopolimera

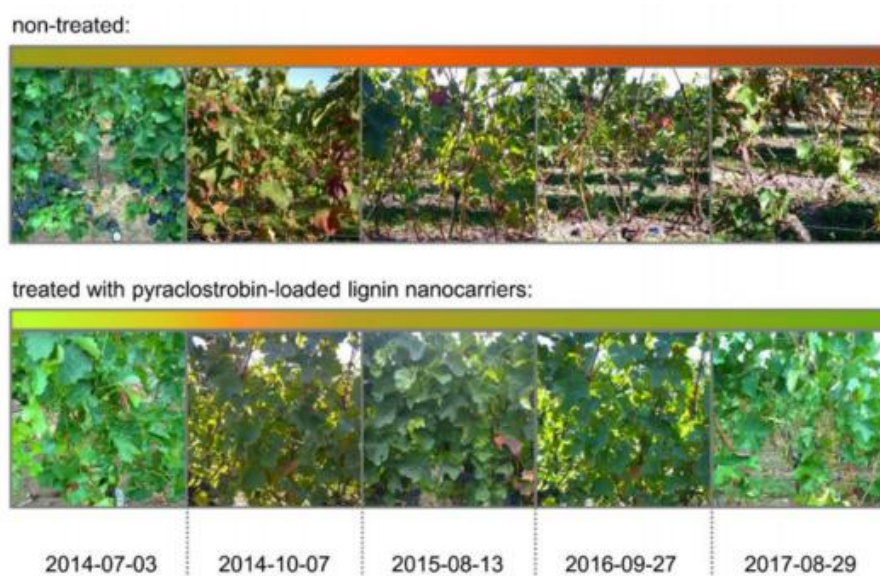
U posljednjem desetljeću sve je veći broj studija o inkapsulaciji gnojiva i pesticida u nanonosace s ciljem kontinuiranog otpuštanja tvari za podešavanje njihovog unosa i učinkovitosti, ciljanje specifičnih biljnih organa, izbjegavanje otpornosti štetočinja i prevladavanje ekoloških problema (Parisi i sur., 2015; Scott i sur., 2018). Radi klimatskih promjena potrebno je usvojiti poljoprivredni sustav koji će biti vrlo osjetljiv s obzirom na klimatske parametre, uključujući razvoj sorti usjeva koji su otporni na razdoblja stresa, i omogućivanje metoda održive poljoprivrede, kao što su primjena bioinokulanata koji dovode do značajnog smanjenja stakleničkih plinova i smanjene ovisnosti o kemijskim pesticidima i gnojivima (Arora, 2019; Pomarici i Vecchio, 2019).

Biopolimerni nanonosaci predstavljaju potencijalno ekološki prihvatljivu alternativu zbog svog obnovljivog podrijetla i biorazgradivosti pri čemu ne nastaje mikroplastika (Machado i sur., 2022). Najkorišteniji biopolimeri za sintezu nanostrukture koji se koriste u poljoprivredi su alginat, celuloza, kitozan, lignin, polilaktična kiselina i polipeptidi.

Kitozan se dugo koristi u poljoprivredi i hortikulturi, obično kao biopesticid za pozitivnu modulaciju biljkama urođenog sustava otpornosti (Chandra i sur., 2015.), kao stimulator rasta biljaka i kao omotač sjemena (Hadwiger, 2013). Saharan i suradnici 2015. godine istraživali su nanonosace kitozana napunjene bakrom (Cu-kitozan) primijenjene na rajčici te su utvrdili da Cu-kitozan pomaže kod suzbijanja rane plamenjače i fuzarijske bolesti rajčice.

Celuloza je najzastupljeniji biopolimer. Celulozni nanomaterijali opsežno su proučavani kao nanovlakna i nanokristali u različitim morfologijama (Li i sur., 2015). Unatoč poteškoćama u radu s celulozom u otopini zbog zahtjevnih potrebnih uvjeta, nedavno su se pojavile neke strategije koje omogućuju proizvodnju nanostrukture izvedenih iz nje te su nedavno razvijene nanočestice na bazi celuloze (Chin i sur., 2018). Machado i suradnici (2021.) kemijski su modificirali celulozu s undecilenskom kiselinom za inkapsulaciju hidrofobnih fungicida tiol-enskim umrežavanjem u miniemulziji. Fungicidi kaptan i piraklostrobin inkapsulirani su tim postupkom s učinkovitošću inkapsulacije od 80-100 %. Celulozni nanonosaji su testirani u antifungalnim testovima *in vitro* protiv *Neonectria ditissima*, *Phaeoacremonium minimum* i *Phaeomoniella chlamydospora* korištenjem konvencionalnog čvrstog hranjivog medija za uzgoj gljiva kao pozitivne kontrole i higromicina kao pozitivne kontrole. Celulozni nanonosaji puni djelotvorne tvari učinkovito su inhibirali rast patogenih gljiva za sojeve koji proizvode celulazu do 75 %.

Lignin je trenutno nedovoljno korišten spoj na biološkoj osnovi, koji ima potencijal pridonijeti održivosti. Lignin je složena i zanimljiva polifunkcionalna makromolekula koja se može podvrgnuti kemijskoj modifikaciji čime je moguće ostvariti velik broj njegovih derivata (Laurichesse i Avérous, 2014; Liu i sur., 2018). Iako je topljivi lignin obilna obnovljiva sirovina, rijetko se koristio za sintezu nanostrukture i tek je nedavno došao u središte interesa studija sinteze nanomaterijala (Chauhan, 2020.) za biomedicinu, kozmetiku, poljoprivredu i slično. Fischer i suradnici 2019. godine proizveli su nanonosaje lignina pune piraklostrobina. Nanonosaji s piraklostrobinom selektivno su inhibirali rast gljiva povezanih s *Escom*, *Phaeomoniella chlamydospora* i *Phaeoacremonium minimum in vitro* (Slika 5.4.2.1.). U daljnjim istraživanjima, Beckers i suradnici 2020. godine pokazali su metodu inkapsuliranja za proizvodnju submikronskih nosača punjenih raznim agrokemikalijama, npr. boskalidom, tebukonazolom, protiokonazolom i azoksistrobinom, za tretiranje biljaka protiv mikoza biljaka.



Slika 5.4.2.1. Biljke vinove loze tretirane s nanonosajima napunjenim piraklostrobinom (gore) i netretirane biljke (dolje) tijekom razdoblja od 4 godine.

Izvor: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868622000471> - Pristup 05.06.2023.

Polipeptidi, polimeri izvedeni iz aminokiselina, također su unutar precizne poljoprivrede pronašli svoj značaj kao nanonosaci, međutim, polipeptidni nanonosaci nisu tako rašireni kao nanonosaci na bazi ugljikohidrata/polifenola (Chugh i sur., 2010). Za ove biopolimere kao nanonosace potrebna su daljnja istraživanja kako bi se utvrdila njihova učinkovitost u suzbijanju biljnih patogena.

5.4.3. Nanotehnologija u genetičkom inženjeringu

Još jedna prilika za korištenje nanotehnologije u poljoprivredi je njena primjena u dostavi tj. unosu DNA u biljke za transformiranje biljne genomske DNA s ciljem ostvarivanja otpornosti biljaka na štetočinje (Rai i Ingle, 2012.; Sabry i Ragaei, 2018.). Ovim se nastoji smanjiti upotreba potencijalno ekološki štetnih kemijskih pesticida.

Nanočestice se mogu koristiti u biljnom genetičkom inženjeringu za pasivnu isporuku fragmenata DNA neophodnih za uređivanje genoma u protokolima temeljenim na nukleazi (IPPC Secretariat, 2021). Ova metoda prevladava izazove trenutno prevladavajućih metoda prijenosa gena uzrokovanih fizičkom barijerom višeslojne i krute stijenke biljne stanice koja je dugo uzrokovala zaostajanje napretka u biljnom genetičkom inženjeringu za onim ostvarenim u životinjskim sustavima (Cunningham i sur., 2018). Neke tehnike za isporuku DNA u životinjske stanice mogu se u kontroliranim uvjetima prilagoditi primjeni na biljkama (Chang i sur., 2013).

6. Management biljnih bolesti

Povijesno oslanjanje na visoko učinkovite fungicide za suzbijanje biljnih patogena i, u određenoj mjeri, insekticide za kontrolu vektora virusa, oblikovalo je način na koji fitopatolozi razmišljaju o biljnim bolestima i upravljanju njima (engl. *plant disease management*; Jeger i sur., 2021). Nije uvijek bio slučaj da inovacije i razvoj u suzbijanju bolesti ovise o napretku u epidemiološkom razumijevanju (Jeger, 2004).

Management biljnih bolesti suočava se sa sve većim izazovima zbog:

1. sve veće potražnje za cjelovitom, sigurnom i raznolikom hranom za potporu rastuće globalne populacije i njezinog sve boljeg životnog standarda;
2. smanjenog proizvodnog potencijala u poljoprivredi zbog konkurencije za plodnim područjima i iscrpljenosti marginalnih obradivih površina;
3. pogoršanja ekoloških uvjeta agroekosustava i iscrpljivanja prirodnih resursa i
4. povećanog rizika od epifitocija biljnih bolesti kao rezultat intenziviranja poljoprivrede i monokultura (He i sur., 2016).

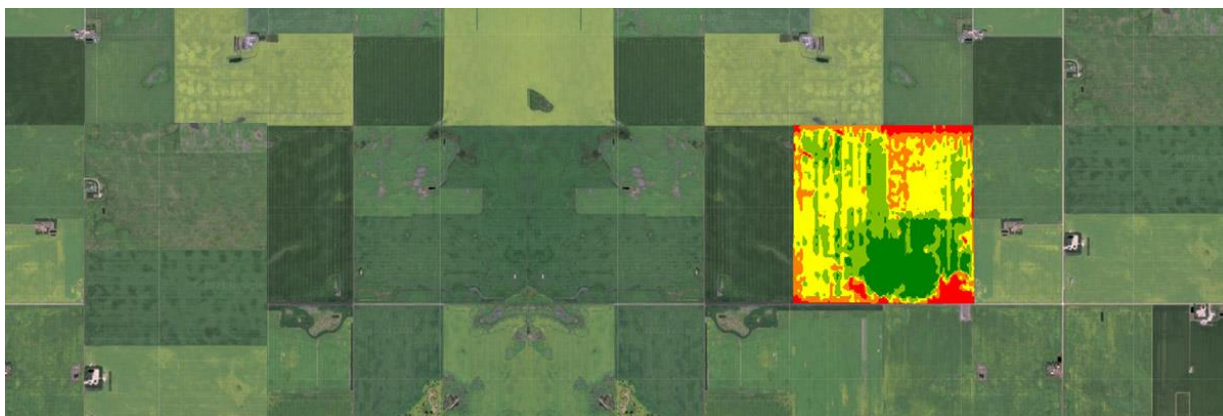
Za rješavanje ovih problema potreban je razvoj tehnologije pametne kontrole štetočinja (Kanwal i sur., 2022.), poboljšanje sustava kontrole štetočinja u poljoprivredi i stroža regulacija stranih vrsta kako bi se podaci o izbijanju štetočinja prikupili na pravodoban, točan i sveobuhvatan način (Tang i sur., 2023).

6.1. Precizna poljoprivreda

Precizna poljoprivreda definira se na razne načine, a autori se uglavnom usuglašavaju kako se radi o upravljanju cijelim gospodarstvom pomoću informacijskih tehnologija, upotrebom satelitskog pozicioniranja te daljinskog upravljanja procesima i strojevima (Gospodarski list, 2018). Pokrenuta je ranih 1980-ih koristeći nove dostupne tehnologije za poboljšanje primjene gnojiva različitim količinama i mješavinama prema potrebi unutar polja (Robert, 2001).

Cilj precizne poljoprivrede je optimizirati učinkovitost proizvodnje i ujednačiti proizvodnju na cijelom polju, optimizirati kvalitetu usjeva, minimizirati utjecaj na okoliš i minimizirati rizik s gledišta prihoda i okoliša. Jedna od glavnih primjena precizne poljoprivrede koja se temelji na reviziji okoliša je kontrola epifitotičnih bolesti. Epifitocije imaju ozbiljne posljedice na proizvodnju usjeva. Ključni igrač u epidemijskim bolestima su klimatske promjene koje se događaju neočekivano u vremenu i prostoru, što njihov utjecaj čini još težim (Khatabb i sur., 2019).

Precizna ili digitalna poljoprivreda uključuje široku paletu tehnoloških dostignuća, kao što su robotika, tehnologija dronova, bežični sustavi, automatizacija temeljena na IoT-u (*Internet of Things*) i mobilnim aplikacijama za kontinuirano praćenje, procjenu i upravljanje uvjetima tla, vodnim resursima i vremenskim fluktuacijama na poljoprivrednim zemljištima za povećanje produktivnosti polja i smanjenje operativnih troškova (Basso i Antle, 2020). Precizna poljoprivreda omogućuje uzgajivačima postizanje većih prinosa uz manje inputa. Na primjer, karte VRA (*Variable Rate Application*) pomažu poljoprivrednicima da povećaju plodnost tla izračunavanjem potrebne količine gnojiva i primjenom agrokemikalija točno tamo gdje je to potrebno (Slika 6.1.1.; EOS DATA ANALYTICS, 2022).



Slika 6.1.1. Tehnologija VRA (engl. *Variable Rate Application*) karata.

Izvor: <https://www.agrivi.com/blog/variable-rate-technology/> - Pristup 07.06.2023.

Tehnike daljinskog očitavanja omogućuju poljoprivrednicima redovito praćenje stanja vegetacije i rano poduzimanje mjera kako bi se spriječili problemi koji prijete usjevima. Poljoprivrednici, poljoprivredne banke, zadruge i dobavljači inputa mogu pristupiti točnim podacima kako bi razumjeli sposobnost poljoprivrednih gospodarstava za uzgoj usjeva i predvidjeli prinose (EOS DATA ANALYTICS, 2022).

6.1.1. Umjetna inteligencija u detekciji/monitoringu

Umjetnom inteligencijom (AI) smatramo svaki neživi sustav koji ima sposobnost snalaženja, zaključivanja, učenja i planiranja. Njen osnovni cilj je rješavanje problema analiziranjem prethodne situacije samostalnim radom. Fenotipizacija biljnog stresa temeljena na računalnom vidu, dijagnostici i procjeni ozbiljnosti biljnih bolesti uzela je maha u hortikulturnim i ratarskim usjevima (Prahba, 2021). Stranice na internetu temeljene na mrežnim sensorima za biomarkere bolesti, poput hlapljivih organskih spojeva, koristi se za rano otkrivanje i predviđanje biljnih bolesti i studije interakcije domaćin-patogen. Bepilotne letjelice koriste se za fenotipizaciju voćnjaka za preciznu primjenu kemikalija za zaštitu bilja. Terenska dijagnostika temeljena na pametnim telefonima postaje sve popularnija diljem svijeta, posebice na udaljenim lokacijama gdje je laboratorijska dijagnostika bolesti otežana (Prahba, 2021). Uz pomoć umjetne inteligencije i algoritama strojnog učenja, ove tehnologije mogu omogućiti integraciju prostorno-vremenske dinamike bolesti na razini poljoprivrednog gospodarstva. S podacima o okolišu, karakteristikama tla i agronomskim praksama, to dovodi do ciljanih intervencija u zaštiti od biljnih bolesti (Jeger i sur., 2021).

Nedavno su primijenjene nove aplikacije koje koriste obučene pse za otkrivanje bolesti u biljkama i ljudima (kao što je COVID-19), s visokom preciznošću koja može doseći više od 95%. U digitalnom vinogradarstvu (DV), psi su trenirani za otkrivanje jednog od najvažnijih insekata u industriji (*Phylloxera*). Digitalni pristup usvojen s ovim biološkim sensorima je u obliku računalnih aplikacija u pametnim telefonima smještenim na psećim ruksacima, koje mogu bilježiti akcelerometar i geo-poziciju podataka s mobilnih uređaja. Ovaj je sustav korišten za treniranje algoritma umjetne inteligencije za otkrivanje kada pas trči ili otkrivanje ciljanih podražaja. Prva aplikacija razvijena u te svrhe je Inspector Paw, koju je testirala

skupina za istraživanje digitalne poljoprivrede, hrane i vina (Sveučilište u Melbourneu) za stvaranje različitih AI modela koji uključuju pse (Fuentes i sur., 2021).

6.1.2. Modeli strojnog učenja (ML)

Istraživanja koja su proveli Kaur i Devendran (2021.) govore o pristupu koji se temelji na strojnom učenju (ML) za klasifikaciju biljnih bolesti. Za izdvajanje značajki iz ulaznih slika primijenjeno je nekoliko algoritama, lokalni binarni uzorak (LBP), matrica supojavljanja razine sive boje (GLCM), transformacija značajki s nepromjenjivim pomakom (SIFT) i Gabor. ML klasifikatori, točnije potporni vektorski stroj (SVM), k-algoritam najbližih susjeda (KNN), umjetna neuronska mreža (ANN) i slučajna šuma (RF) obučeni su za izvršavanje zadatka kategorizacije biljnih bolesti. Ovo istraživanje postiže najbolji rezultat za Gaborove značajke s klasifikacijskom točnošću od 90,23%; međutim, potrebna su daljnja poboljšanja za točnu detekciju biljnih bolesti.

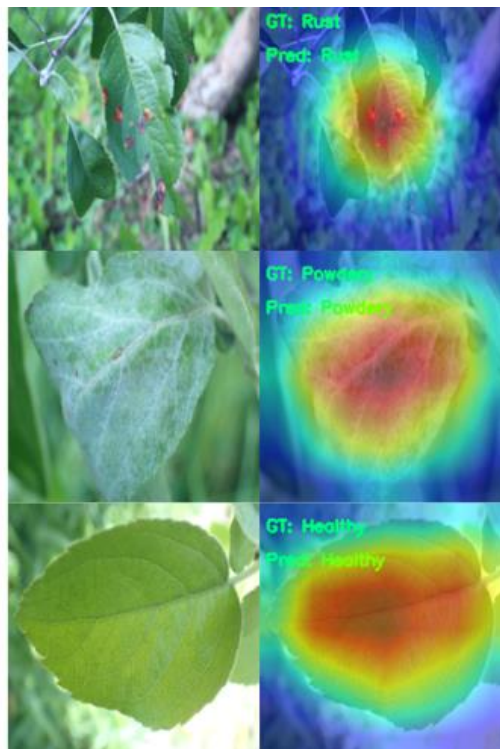
Le i suradnici (2020.) predstavili su pristup lociranju i kategorizaciji usjeva i bolesti uzrokovanih korovima. Šum iz sumnjivih uzoraka uklonjen je primjenom operacije morfološkog otvaranja i zatvaranja. U sljedećem koraku uveden je prilagođeni model, filtrirani pristup LBP zajedno s konturnom maskom i koeficijentom k (k-FLBPCM) kako bi se izdvojile ključne točke iz poboljšane slike. Izračunate ključne točke korištene su za SVM obuku kako bi se postigla kategorizacija bolesne regije lista. Tehnika Le et al. (2020.)

Pantazi i suradnici (2019.) predstavili su metodu za lociranje i kategorizaciju nekoliko bolesti usjeva. U prvom koraku, pristup GrabCut korišten je preko sumnjive slike za izvođenje segmentacije uzorka. U sljedećem koraku, transformacija nijansi boje, zasićenosti i vrijednosti HSV primijenjena je na segmentiranu sliku iz koje su značajke izračunate pomoću algoritma LBP. Izdvojene ključne točke korištene su za obuku SVM-a. Ova istraživanja učinkovita su za kategorizaciju područja zahvaćenih listovima biljaka s točnošću od 95%.

6.1.3. Modeli dubokog učenja (DL)

Pristupi temeljeni na dubokom učenju (DL) se sada intenzivno primjenjuju u različitim poljima, uključujući i poljoprivredu (Liu i Wang, 2021). Ove tehnike automatski izračunavaju diskriminativne značajke izravno iz ulaznih uzoraka, čime se izbjegava komplicirana predobrada slike i smanjuje memorijski otisak (Albattah i sur., 2022). Konvolucijska neuronska mreža (CNN) dobro je poznati DL model koji je pokazao učinkovitu izvedbu u prepoznavanju uzoraka i za ranu identifikaciju bolesti lista biljaka. Ovi su pristupi pokazali obećavajuće rezultate u zadacima klasifikacije usjeva zbog svoje učinkovitosti. Zrele CNN arhitekture u računalnom vidu kao što su AlexNet (Rangarajan i sur, 2018), ResNet (Richey i sur., 2020; Slika 6.1.3.1.), mobilni Net (Bi i sur., 2020.) i dr. uvelike se koriste u postojećim metodama kategorizacije biljnih bolesti. Istraživanja provedena od strane Atila i suradnika (2021.) dizajnirala su prilagođene mrežne arhitekture za rješavanje scenarija iz stvarnog svijeta kao što su okluzija, slabo osvjetljenje i različita klimatska okruženja. Trenutačno se algoritmi za otkrivanje objekata koji se temelje na DL-u neprestano razvijaju i usvajaju za primjenu u lokaliziranju i klasificiranju bolesti biljaka (Zhang i sur., 2020). Ove metode određuju točnu lokaciju i klasu bolesti. Unatoč nedavnom napretku, još uvijek postoji potreba za poboljšanjem u primjeni arhitektura DL, posebice novih DL arhitektura za

klasifikaciju bolesti usjeva u smislu robusnosti generalizacije i točnosti identifikacije (Albattah i sur., 2022).



Slika 6.1.3.1. Karte aktivacije klase za prepoznavanje bolesti biljaka za predviđanja napravljena modelom ResNet34.

Izvor: <https://debuggercafe.com/plant-disease-recognition-using-deep-learning-and-pytorch/> Pristup - 20.06.2023.

6.1.4. Digitalna fenotipizacija

Najodrživija metoda u zaštiti usjeva je oplemenjivanje s ciljem kreiranja otpornih biljnih sorti. Uzgojem otpornih sorti može se smanjiti primjena sredstava za zaštitu bilja i time smanjiti negativni utjecaj poljoprivrede na okoliš. Otporne sorte predstavljaju učinkovito, jeftino i ekološki prihvatljivo sredstvo za management biljnih bolesti (Willoquet i sur., 2017). U oplemenjivanju bilja fenotipizacija genotipova ostvaruje se dugotrajnim i skupim vizualnim ocjenjivanjem biljaka. Nedavno su provedena intenzivna istraživanja kako bi se razvile inovativne optičke metode za procjenu interakcije kompatibilnih i nekompatibilnih biljnih patogena. Ovi pristupi, koji kombiniraju klasičnu fitopatologiju ili mikrobiologiju s tehnološkim metodama (kao što su senzori, robotika, strojno učenje i umjetna inteligencija) mogu se sažeti u pojam digitalna fenotipizacija.

Za razliku od uobičajenih metoda vizualnog ocjenjivanja, otkrivanja i procjene, optički senzori u kombinaciji s naprednim metodama analize podataka mogu neinvazivno i objektivno uočiti i zabilježiti promjene izazvane patogenom u fiziologiji osjetljivih ili otpornih biljaka. Fenotipizacija otpornosti na bolesti ima različite zadatke. U ranom koraku uzgoja, kvalitativna procjena i karakterizacija specifične otpornosti ima za cilj povezati je s npr. genetičkim markerom. Kasnije, tijekom stakleničkih i terenskih probira, relevantna je

procjena razine osjetljivosti različitih genotipova (Mahlein i sur., 2019). Globalna sigurnost hrane, identifikacija odgovarajućih i učinkovitih sirovina za biogoriva biljnog podrijetla i suočavanje s klimatskim promjenama najvažniji su ciljevi suvremenih znanstvenika, političara i šire javnosti. Kako bi riješili te probleme, potrebni su novi visokoprosinotni genotipovi poljoprivrednih usjeva prilagođeni budućoj klimi (Furber i Tester, 2011).

6.1.5. Detekcija korištenjem dronova

Posljednjih godina, zbog napretka tehnologije, uvedeni su automatizirani sustavi upravljanja procesima koji se temelje na slikama i koji mogu automatski identificirati zaražene biljke i fitomedicinama ponuditi vrijedan uvid u situaciju u usjevu (Singh i sur., 2020). U početku su predloženi modeli temeljeni na strojnom učenju (ML) za identifikaciju i klasifikaciju biljnih bolesti (Albattah i sur., 2022). Metode kao što su potporni vektorski stroj (SVM) (Elangovan i Nalini, 2017.), stablo odlučivanja (DT) (Rokach i Maimon, 2005.), slučajna šuma (RF) (Ramesh i sur., 2018.) i K-najbliži susjedi (KNN) (Liao i Vemuri, 2002.) korištene su za rano i točno otkrivanje biljnih bolesti (Albattah i sur., 2022). Tehnike temeljene na ML-u jednostavnije su za implementaciju i ne zahtijevaju ogromne podatke u obuci. Međutim, oni su spori zbog složene predobrade i ovise o znanju iskusnih ljudskih stručnjaka za ekstrakciju i odabir odgovarajućih značajki potrebnih za realizaciju klasifikacije (Dargan i sur., 2020). Učinkovitost detekcije ovih pristupa ovisi o kvaliteti i zastupljenosti izdvojenih značajki i podložna je pogreškama pri radu s velikom količinom podataka, stoga tehnike temeljene na ML-u imaju ograničenu točnost za automatsku identifikaciju biljnih bolesti (Albattah i sur., 2022).

Albattah i suradnici (2022.) proveli su automatiziranu metodu temeljenu na dronovima, odnosno poboljšani EfficientNetV2 za detekciju i klasifikaciju bolesti listova biljaka. EfficientNetV2 koristi se kao *end-to-end* mreža za izračunavanje robusnog skupa ključnih točaka slike i njihovo klasificiranje u njihove odgovarajuće klase. Metoda koju su proveli može precizno prepoznati i kategorizirati različite klase abnormalnosti listova biljaka iz baze podataka PlantVillage. Predstavljena tehnika je vješta za kategorizaciju bolesti usjeva prema pojavi nekoliko izobličenja slike, tj. promjena u svjetlini, kontrastu, boji, položaju, kutu i strukturi bolesti listova. Modificirani EfficientNetV2 predstavlja jeftino rješenje za klasifikaciju bolesti listova biljaka što ga čini učinkovitim za scenarije stvarnog svijeta (Albattah i sur., 2022).

6.1.6. Molekularno profiliranje

Molekularno profiliranje je najpouzdanija metoda za otkrivanje i praćenje širenja biljnih bolesti (Singh i sur., 2023). Sada je dostupno nekoliko metoda za brzo izdvajanje DNA u samo jednoj minuti, bez upotrebe sofisticiranih laboratorijskih instrumenata ili skupih pribora i kemikalija, a mogu se proširiti kako bi se poboljšalo praćenje bolesti na licu mjesta (Paul i sur., 2020). Na primjer, sada su dostupne dijagnostičke platforme temeljene na pametnim telefonima koje izvode izotermno umnožavanje nukleinske kiseline i dizajnirane su za brzo i jeftino otkrivanje patogena u biljkama (Paul i sur., 2020). Ultraprijenosne platforme, kao što je POCKET, su jeftine i omogućit će svestrani pristup od uzorka do

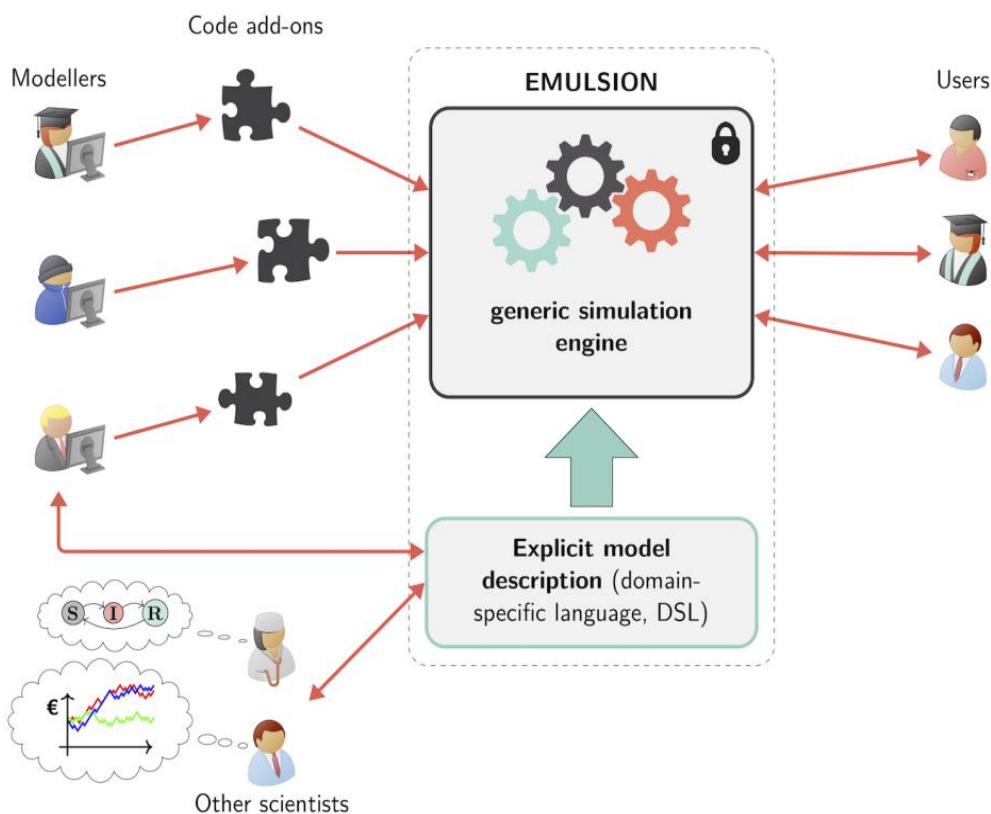
odgovora za dijagnostiku patogena (Xu i sur., 2020). Minijaturizirane platforme za sekvenciranje kao što su MinION ili SmidgION značajno će poboljšati prijenosnu DNA/RNA analizu, dok je korištenje praktične platforme za sekvenciranje u isplativim tehnologijama sekvenciranja cijelog genoma ključno za omogućavanje nadzora (identitet genotipa i soja), čime se ubrzavaju studije o podrijetlu epifitocija, praćenju prijenosa i evoluciji patogena (Singh i sur., 2023).

6.1.7. Modeliranje budućih izbijanja bolesti

Matematički modeli koji kombiniraju epidemiologiju s prostornim komponentama i populacijskom heterogenošću moćni su alati za kvantificiranje vjerojatnosti uspjeha praksi za suzbijanje štetnika i patogena (Thompson i sur., 2018). Ovi modeli pružaju kritične informacije o najučinkovitijim mjerama kontrole, vremenu i prikladnosti intervencije, odabiru mjesta i ravnoteži troškova za realistično upravljanje novim štetočinjama i patogenima (Singh i sur., 2023).

Mrežne rekonstrukcije na razini genoma mogu modelirati unutarstanični metabolizam kako bi se predvidjela virulencija i interakcije patogena i domaćina pod nizom okolišnih i fizioloških uvjeta (Xu i sur., 2021). Takvi se modeli sada koriste za pružanje detaljnih uvida u interakcije između invazivnog patogena i mikrobioma povezanog s domaćinom kako bi se predvidjela pojava bolesti i planirale intervencije (Heinken i sur., 2021). Pristupi ekološkog modeliranja mogu pružiti informacije o uspješnoj kolonizaciji invazivnih patogena u složenom mikrobiomu domaćina, a statistički modeli mogu pružiti informacije o izravnim i neizravnim utjecajima okolišnih i biotičkih varijabli na učestalost bolesti (Liu i sur., 2023). Istovremeno, dinamički mrežni modeli dopuštaju uključivanje nekoliko aspekata epidemiologije bolesti, uključujući molekularne i stanične reakcije, interakcije biljka–vektor–patogen, interakcije vrsta unutar mikrobioma, kao i međunarodnu trgovinu i društvene mreže (Garrett i sur., 2018).

Razvoj modela uključuje multidisciplinarnu integraciju znanja, a pristup modeliranju trebao bi biti transparentan i fleksibilan kako bi omogućio korisnicima da odaberu razinu detalja s kojima bi se željeli baviti (Garrett i sur., 2022). Primjer modela je EMULSION, koji povezuje generički simulacijski mehanizam s jezikom modeliranja specifičnim za domenu putem strukturiranih tekstualnih datoteka, čitljiv je znanstvenicima iz različitih područja (epidemiolozima, biologima, ekonomistima) i omogućuje tim znanstvenicima da potvrde ili revidiraju pretpostavke u bilo kojoj fazi razvoja modela (Slika 6.1.7.1.; Picault i sur., 2019; Singh i sur., 2023).



Slika 6.1.7.1. Generički simulacijski mehanizam (EMULSION).

Izvor: <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1007342> - Pristup 18.06.2023.

6.1.8. Druge tehničke inovacije

Ostale metode, uključujući hiperspektralno oslikavanje, otiske hlapljivih organskih spojeva i daljinsko očitavanje, imaju potencijal revolucionirati sektor nadzora patogena i bolesti (Singh i sur., 2023). Hipertermalni i termalni skupovi podataka daju jedinstvene potpise za razlikovanje zaraze stabala maslina s dva različita ksilemom ograničena patogena; *Xylella fastidiosa* i *Verticillium dahliae* (Zarco-Tejada i sur., 2021). Senzor hlapljivih organskih spojeva koji se temelji na pametnom telefonu može profilirati ključne biljne metabolite na razini jednog dijela na milijun unutar 1 min, a korišten je za otkrivanje *Phytophthora infestans* u listovima rajčice umjetno zaraženog u laboratoriju i listovima prikupljenim na polju s više od 95% točnosti (Li i sur., 2019). Slike visoke razlučivosti snimljene tehnologijama daljinskog očitavanja (npr. sateliti i bespilotne letjelice) u kombinaciji s naprednim pristupima strojnog učenja mogu uhvatiti suptilne promjene u kemiji biljaka i otkriti patogene daleko prije nego što simptomi postanu vidljivi (McNish i Smith, 2022).

6.2. Procjena/analiza rizika i kriterija odluka

U novije vrijeme postoji interes za razvoj automatiziranih analiza rizika koje upozoravaju donositelje odluka, od upravitelja poljoprivrednih gospodarstava do nacionalnih

organizacija za zaštitu bilja, na vjerojatnu potrebu za djelovanjem i pružanje podrške pri odlučivanju o ciljanim odgovorima. Trenutno se pregledavaju aplikacije strojnog učenja u patologiji biljaka i sintetiziraju ideje za sljedeće korake razvoja kako bi se maksimalno iskoristili ti alati u digitalnoj poljoprivredi. Globalni projekti, kao što je predloženi globalni sustav nadzora za bolesti biljaka, ojačat će se integracijom širokog spektra novih podataka, uključujući podatke iz alata poput daljinskih senzora, koji se koriste za procjenu rizika od bolesti biljaka (Garret i sur., 2022). Integracija umjetne inteligencije i proširene stvarnosti poboljšat će točnost i automatizaciju za daljinsku dijagnostiku biljnih bolesti i preciznu zaštitu bilja. Koncept "samodostatne, savršene biljke bez bolesti" bi jednom mogao postati stvarnost možda u obliku biohibrida biljke i robota (Prabha, 2021).

6.3. Biološko suzbijanje

Usvajanje metoda biološkog suzbijanja jedan je od ključnih aspekata fitomedicine koji je trenutno u prvom planu. Eksperimentiralo se s raznim strategijama biosuzbijanja, a neke su pokazale veliki uspjeh i obećavaju (Pandit i sur., 2022). Uvođenje bioloških sredstava za kontrolu (BCA) mijenja interakciju između biljaka, patogena i okoliša, što dovodi do bioloških i fizičkih kaskada koje utječu na sposobnost patogena, zdravlje biljaka i ekologiju proizvodnog sustava. Ovi međuodnosi stvaraju krajolik kompromisa između prirodnih i društvenih funkcija biološke kontrole, a potrebna je sveobuhvatna procjena njezinih prednosti, nedostataka i troškova u društvenim i poljoprivrednim perspektivama kako bi se osigurao održivi razvoj (He i sur., 2021).

6.3.1. Mikovirusi kao biokontrolni agensi

Otkriveno je da mikovirusi koji imaju sposobnost zaražavanja gljivičnih patogena imaju potencijal da se koriste kao biološki kontrolni agensi u suzbijanju biljnih bolesti (Pandit i sur., 2022). Utvrđeno je da mikovirusi induciraju hipovirulenciju (smanjena virulencija) kod svojih domaćina i ta je ideja izazvala veliko zanimanje za karakterizaciju virusa iz fitopatogenih gljiva koji se koriste kao agensi za njihovo biološko suzbijanje (Khalifa i MacDiarmid, 2021). Istražuje se mnoštvo mikovirusa, a Garcia-Pedrajas i suradnici (2019.) izvješćuju da većina virusa iz filamentoznih gljiva posjeduje ili genomske dvolančane RNA (dsRNA), ili genomske jednolančane RNA pozitivnog smisla (+) (+ssRNA) s nefunkcionalnim replikativnim intermedijerima dsRNA. Oni mogu posjedovati kapsidu koja tvori prave virione, a ponekad mogu biti bez kapside. Iznenadujuće, otkriveno je da brojne biljne patogene gljive sadrže mikoviruse koji smanjuju virulentnost svog gljivičnog domaćina (Pandit i sur., 2021). U nedostatku izvanstaničnog prijenosnog puta na drugog domaćina, mikovirusi se primarno prenose kroz hifalne anastomoze, ili preko konidija u vertikalnom prijenosu, prilikom razmnožavanja (Garcia-Pedrajas i sur., 2019). Učinkovitost prijenosa ovisi i o gljivičnom domaćinu, i o virusu koji ga zaražava, pa je stoga bilo moguće upotrijebiti metode umjetne transfekcije za zarazu raznih gljivica, čime se njihova moguća upotreba proširuje i na pokušaje suzbijanja drugih patogena, ne samo onih kod kojih su ti virusi identificirani (Pandit i sur., 2021). Međutim, teško je prenijeti ove mikoviruse između vegetativno nekompatibilnih skupina domaćina i stoga je bilo teško razviti komercijalne strategije biokontrole mikovirusa za različite fitopatogene gljive (Khalifa i MacDiarmid, 2021).

7. Istraživanja holobionta i mikrobioma

U životinjskom i biljnom carstvu "holobiont" se sastoji od domaćina i uz njega vezane mikrobiote, tzv. "mikrobioma" (Pitlik i Koren 2017; Jeger i sur., 2021). Nedavni napredak u mikrobnim (inženjering mikrobioma), biokemijskim (hlapljive tvari i biljni elicitori) i alatima sintetske biologije omogućuje nove opcije managementa biljnih bolesti i dodatno smanjuje ovisnost o kemijskom suzbijanju biljnih patogena (Delgado-Baquerizo, 2022).

Javljuju se novi interesi za iskorištavanjem mikrobioma biljaka i tla za ublažavanje negativnih posljedica klimatskih promjena, koji variraju od izravne manipulacije mikrobiomima, do neizravne manipulacije njihovim funkcijama kroz promjene u gospodarenju tlom i poljoprivrednim praksama kroz upotrebu inokulanata ili biokemijskih produkata (Trivedi i sur., 2022). Mikrobní alati kao što su inokulanti ili mikrobiomski inženjering *in situ* obećavaju optimizirani rast biljaka u sve stresnijim uvjetima i uz napade patogena (Singh i sur., 2023). Identificiranje korisne mikrobiote biljke i sjemenke koja se može oduprijeti zarazi patogenima potencijalno bi mogla pružiti učinkovite alate za suzbijanje biljnih bolesti, budući da su neki od ovih mikroorganizama naslijeđeni ili aktivno regrutirani od strane biljke, te je stoga moguće postići uspješnu kolonizaciju domaćina i, u konačnici, ostvariti otpornosti biljke na bolesti (Berg i Raaijmakers, 2018).

Trenutačno se većina istraživanja mikrobioma usredotočuje na bakterijske i gljivične zajednice. Međutim, interakcije biljaka s drugim članovima mikrobioma, kao i interakcije između svih mikroorganizama određuju ukupnu raznolikost i funkcioniranje ovih strategija suzbijanja (Song i sur., 2020). Xiong i suradnici (2020.) otkrili su da dinamiku patogena najbolje predviđaju protisti, za koje je utvrđeno da su u negativnoj korelaciji s obiljem patogena tijekom rasta biljaka rajčice. Bakteriofagi su također pokazali važnu ulogu u rizosferi biljaka rajčice. Različite kombinacije faga smanjile su učestalost zaraze rajčice bakterijom *Ralstonia solanacearum* do 80% (Wang i sur., 2019). Učinci faga na patogene neizravno su promijenili bakterijsku zajednicu, obogaćujući populacije vrsta koje su antagonisti patogena (*Acinetobacter*, *Bacillus*, *Comamonas*, *Ensifer* i *Rhodococcus*) (Song i sur., 2020).

Nedavno je predložena još jedna nova eksperimentalna strategija, tzv holo-omika, koja spaja skupove podataka o domaćinima i mikrobima (Nyholm i sur., 2020.). Eksperimentalni dizajni uparuju omičke strategije usmjerene na domaćina, kao što su transkriptomika, metabolomika, epigenomika i proteomika, s tehnikama usmjerenim na mikrobe koje se češće koriste, kao što su sekvenciranje amplikona, metagenomika, metatranskriptomika i egzometabolomika (Xu i sur., 2021). Takve holo-omske studije imaju moć razriješiti funkcionalnost ekosustava biljnog mikrobioma i pružiti značajne informacije o mikrobnom pristupu poboljšanju zdravlja i fitnesa domaćina, koje će se samo povećati u bliskoj budućnosti (Li i sur., 2021).

8. Klimatski odgovorna poljoprivreda (*Climate Smart Agriculture*)

Klimatski odgovorna poljoprivreda (engl. *Climate-Smart Agriculture, CSA*) je pristup koji pomaže ljudima koji upravljaju poljoprivrednim sustavima da učinkovito odgovore na izazove koje pred poljoprivredu donose klimatske promjene. Radi se o integriranom upravljanju različitim tipovima poljoprivredne proizvodnje (biljna proizvodnja, stočarstvo, šumarstvo i ribarstvo) koje se bavi međusobno povezanim izazovima dostatnih količina hrane i njene sigurnosti uz okolnost ubrzanja klimatskih promjena (The World Bank, 2021). Ovaj pristup se čini kao budućnost fitopatologije i drugih znanstvenih disciplina u poljoprivredi.

Prema podacima Svjetske banke (World Bank, 2021.) CSA ima za cilj istovremeno postizanje triju ishoda:

1. Povećati produktivnost: proizvoditi više hrane i bolju hranu kako bi se poboljšala sigurnost prehrane i povećali prihodi; posebno za 75% siromašnih u svijetu koji žive u ruralnim područjima i uglavnom se oslanjaju na poljoprivredu kao izvor sredstava za život.
2. Povećati otpornost: smanjiti osjetljivost na utjecaje suše, štetnika, bolesti i drugih rizika i stresova povezanih s klimom; poboljšati sposobnost prilagodbe i rasta u uvjetima dugoročnih stresova kao što su skraćena godišnja doba i nestalni vremenski obrasci.
3. Smanjiti emisije: težiti smanjenju emisija za svaku kaloriju ili kilogram proizvedene hrane, izbjegavati krčenje šuma zbog širenja poljoprivrednih područja i identificirati načine za apsorpciju ugljika iz atmosfere.

Iako postoji sve veći broj istraživanja o zemljama u razvoju, posebno u vezi s načinom na koji CSA može transformirati poljoprivredu malih proizvođača, malo je istraživanja koja dokumentiraju iskustva iz razvijenih zemalja. Chandra i suradnici (2018.) upućuju na to da istraživanje CSA-a mora ići dalje od isključivog fokusiranja na znanstvene pristupe i samo određenih geografskih konteksta. Ako CSA treba biti primjenjiv za poljoprivrednike diljem svijeta, tada je interdisciplinarno istraživanje koje je poduprto širokim socio-ekonomskim i političkim kontekstima ključno za razumijevanje kako razlike u narativima mogu utjecati na provedbu na terenu, kako u zemljama u razvoju, tako i u razvijenim zemljama.

9. Zaključna razmatranja

Prema zadnjim dostupnim informacijama koje se spominju u literaturi, klimatske promjene mogle bi utjecati na stope razvoja fitopatogena, uzrokovati pomake u geografskoj distribuciji domaćina i patogena, modificirati otpornost domaćina i rezultirati promjenama u interkacijama biljka-patogen.

Klimatske promjene mogu poremetiti tj. smanjiti dostupnost hrane, te smanjiti njenu kvalitetu. Na primjer, povećanje temperatura, promjene u ekstremnim vremenskim prilikama, promjene u obrascima padalina i smanjenje dostupnosti vode mogu dovesti do smanjene produktivnosti poljoprivrede. Rana izvješća o pojavi bolesti biljaka rezultat su učinkovitog nadzora biljne proizvodnje, a preduvjet su za uspješnu realizaciju suzbijanja biljnih patogena (Garret i sur., 2022).

Potreban je multidisciplinarni pristup za razumijevanje biologije i ekologije patogena od molekularne do globalne razine. Integracija dostupnih bioloških podataka o patogenima s prometom, trgovinom, klimom i geografijom može poboljšati praćenje i snagu predviđanja pojave biljnih bolesti. To se može dodatno potpomoći stalnim monitoringom (vizualni pregledi usjeva, laboratorijska dijagnostika, biokemijski senzori, alati za daljinsko očitavanje uz konstantnu uključenost poljoprivrednika i savjetodavaca), kvalitetnom obradom prikupljenih podataka uz primjenu resursa umjetne inteligencije u pripremi analiza i prognoza, te u procjeni rizika od predstojećih novih pojava biljnih bolesti.

Lokalni podaci mogu se koristiti za predviđanje širenja areala značajnih bolesti, a to se pomoću alata za modeliranje i AI može podići na regionalnu i globalnu razinu. Osim što pridonose procjenama utjecaja bolesti na proizvodnju hrane, alati *Climate-Smart* poljoprivrede pridonosit će drugim društveno-ekonomskim pokazateljima (npr. posao, prihod, mentalno zdravlje), čime će se podržavati razvoj i ublažavati utjecaji klimatskih promjena.

Fitomedicina budućnosti će biti oslonjena na preciznu poljoprivredu, nove, ekološki prihvatljive kemikalije i biološke agense, a vjerojatno će se baviti modifikacijama mikrobioma biljke i cijelog holobionta s ciljem nastavka ostvarivanja uspješne proizvodnje bilja.

Popis literature

1. Abdelraouf A.M.N., Hussain A.A., Naguib D.M. (2023). Nano-chitosan encapsulated *Pseudomonas fluorescens* greatly reduces Fusarium wilt infection in tomato. *Rhizosphere* 25, 100676.
2. Abdou Zayan S. (2020). Impact of Climate Change on Plant Diseases and IPM Strategies. *Plant Diseases - Current Threats and Management Trends* (ed. Topolovec-Pintarić S.). IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.80762.
3. Albattah W., Javed A., Nawaz M., Masood M., Albahli S. (2022). Artificial Intelligence-Based Drone System for Multiclass Plant Disease Detection Using an Improved Efficient Convolutional Neural Network. *Front. Plant Sci.* 13. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.808380/full#B51> (pristupljeno - 20. lipnja 2023.).
4. Altieri M.A., Nicholls C.I. (2017). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Clim. Chang.* 140, 33-45.
5. Amaral P.H.R., Andrade P.L., Conto L.C. (2019). Microencapsulation and Its Uses in Food Science and Technology: A Review. (ed. Salaün F.). IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.81997.
6. Arora N.K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environ Sustainabil* 2, 95.
7. Atila Ü, Uçar M., Akyol K., Uçar E. (2021). Plant leaf disease classification using efficientnet deep learning model. *Ecol. Inform.* 61, 101182. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574954120301321> (pristupljeno - 21. lipnja 2023.).
8. Balcázar J.L., Subirats J., Borrego C.M. (2015). The role of biofilms as environmental reservoirs of antibiotic resistance. *Front. Microbiol.* 6, 1216.
9. Basso B., Antle J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nat. Sustain.* 3, 254–256.
10. Bathiany S., Dakos V., Scheffer M., Lenton T.M. (2018). Climate models predict increasing temperature variability in poor countries. *Sci. Adv.* 4 DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar5809>.
11. Battilani P., Toscano P., Van der Fels-Klerx H.J., Moretti A., Camardo Leggieri M., Brera C., Rortais A., Goumperis T., Robinson T. (2016). Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci Rep* 6, 24328.
12. Bebber D.P., Holmes T., Gurr S.J. (2014). The global spread of crop pests and pathogens. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23, 1398–1407.
13. Beckers S., Peil S., Wurm F.R. (2020). Pesticide-Loaded Nanocarriers from Lignin Sulfonates a Promising Tool for Sustainable Plant Protection. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 18468–18475.
14. Beckerman, J., Palmer, C., Tedford, E., Ypema, H. (2023). Fifty Years of Fungicide Development, Deployment, and Future Use. *Phytopathology*, 113(4), 694–706.
15. Belščak-Cvitanović, A., Stojanović, R., Manojlović, V., Komes, D., Juranović Cindrić, I., Nedović, V., Bugarski, B. (2011) Encapsulation of polyphenolic antioxidants from medicinal plant extracts in alginate-chitosan system enhanced with ascorbic acid by electrostatic extrusion. *Food Res. Int.* 44, 1094-1101.
16. Berg G., Raaijmakers J.M. (2018). Saving seed microbiomes. *ISME J.* 12, 1167–1170.

17. Bi C., Wang J., Duan Y., Fu B., Kang J.R., Shi Y. (2020). MobileNet based apple leaf diseases identification. *Mob. Netw. Appl.* 27, 172–180.
18. Bingna H., Feifei C., Yue S., Kun Q., Yan W., Changjiao S., Xiang Z., Bo C., Fei G., Zhanghua Z., Haixin C. (2018). Advances in targeted pesticides with environmentally responsive controlled release by nanotechnology. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)* 8(2), 102. <https://www.mdpi.com/2079-4991/8/2/102> (pristupljeno - 2. lipnja 2023.).
19. Boland G.J., Melzer M.S., Hopkin A., Higgins V., Nassuth A. (2004). Climate change and plant diseases in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* 26, 335–350.
20. Bostock R.M., Pye M.F., Roubtsova T.V. (2014). Predisposition in plant disease: exploiting the nexus in abiotic and biotic stress perception and response. *Annual Review of Phytopathology* 52, 517–549.
21. Brent K.J., Holloman D.W. (2007). Fungicide resistance in crop pathogens: how can it be managed? FRAC monograph No. 1. 2nd ed.: Fungicide Resistance Action Committee. Brussels.
22. Carvajal-Yepes M., Cardwell K., Nelson A., Garrett K.A., Giovani B., Saunders D., Kamoun S., Legg J.P., Verdier V., Lessel J., Neher R.A., Day R., Pardey P., Gullino M.L., Records A.R., Bextine B., Leach J.E., Staiger S., Tohme J. (2019). A global surveillance system for crop diseases. *Science* 364, 1237–1239.
23. Cha J.Y., Han S., Hong H.J., Cho H., Kim D., Kwon Y., Kwon S.K., Crüseman M., Bok Lee Y., Kim J.F., Giaever G., Nislow C., Moore B.S., Thomashow L.S., Weller D.M., Kwak Y.S. (2016). Microbial and biochemical basis of a Fusarium wilt-suppressive soil. *ISME J.* 10, 119-129.
24. Chaloner T. M., Gurr S.J., Bebbler D.P. (2021). Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change* 11, 710–715.
25. Chandra S., Chakraborty N., Dasgupta A., Sarkar J., Panda K., Acharya K. (2015). Chitosan nanoparticles: A positive modulator of innate immune responses in plants. *Sci Rep* 5, 1-14.
26. Chandra A., McNamara K.E., Dargusch P. (2018). Climate-smart agriculture: perspectives and framings. *Climate Policy* 18(4), 526-541.
27. Chang F.P., Kuang L.Y., Huang C.A., Jane W.N., Hung Y., Hsing Y.I., Mou C.Y. (2013). A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers. *Journal of Materials Chemistry B: Materials for Biology and Medicine* 1(39): 5279–5287.
28. Chauhan P.S. (2020). Lignin nanoparticles: Eco-friendly and versatile tool for new era. *Biores Technol.*, 100374.
29. Chin S. F., Jimmy F.B., Pang S.C. (2018). Size controlled fabrication of cellulose nanoparticles for drug delivery applications. *J Drug Deliv Sci Technol* 43, 262-266.
30. Chhipa H. (2019). Applications of nanotechnology in agriculture. *Methods in Microbiology* 46, 115-142.
31. Choudhury R.A., Garrett K.A., Klosterman S.J., Subbarao K.V., McRoberts N. (2017). A Framework for Optimizing Phytosanitary Thresholds in Seed Systems. *Phytopathology* 107(10), 1219–1228.
32. Chugh A., Eudes F., Shim Y.S. (2010). Cell-penetrating peptides: Nanocarrier for macromolecule delivery in living cells. *IUBMB Life* 62, 183-193.
33. Cohen S.P., Leach J.E. (2020). High temperature-induced plant disease susceptibility: more than the sum of its parts. *Current Opinion in Plant Biology* 56, 235-241.

34. Cortés A.J., López-Hernández F., Blair M.W. (2022). Genome–environment associations, an innovative tool for studying heritable evolutionary adaptation in orphan crops and wild relatives. *Front Genet.* 13:910386.
35. Cunningham F.J., Goh N.S., Demirer G.S., Matos J.L., Landry M.P. (2018). Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering. *Trends in Biotechnology* 36(9): 882–897.
36. Dargan S., Kumar M., Ayyagari M.R., Kumar G. (2020). A survey of deep learning and its applications: a new paradigm to machine learning. *Arch. Comput. Methods Eng.* 27, 1071–1092.
37. Delgado-Baquerizo M. (2022). Simplifying the complexity of the soil microbiome to guide the development of next-generation SynComs. *J. Sustain. Agric. Environ.* 1, 9–15.
38. Devi P.I., Manjula M., Bhavani R.V. (2022). Agrochemicals, Environment, and Human health. *Annual Review of Environment and Resources* 47(1), 399-421. <https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev-environ-120920-111015> (pristupljeno - 14. svibnja 2023.).
39. Durán P., Jorquera M., Viscardi S., Carrion V.J., de la Luz Mora M., Pozo M.J. (2017.). Screening and characterization of potentially suppressive soils against *Gaeumannomyces graminis* under extensive wheat cropping by Chilean indigenous communities. *Front. Microbiol.* 8, 1552. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01552> (pristupljeno - 25. svibnja 2023.).
40. Elad Y., Pertot I. (2014). Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. *J. Crop Improv.* 28, 99-139.
41. Elangovan K., Nalini S. (2017). Plant disease classification using image segmentation and SVM techniques. *Int. J. Comput. Intell. Res.* 13, 1821–1828.
42. Elmer W.H. (2001). Seeds as vehicles for pathogen introduction. *Biol. Invasions* 3, 263–271.
43. EOS DATA ANALYTICS (2022). How precision farming fight climate change. <https://eos.com/blog/how-precision-farming-fights-climate-change/> (pristupljeno - 07. lipnja 2023.).
44. European Commission (2022). Consequences of climate change. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en (pristupljeno - 20. svibnja 2023.).
45. Fahim M.A., Hassanein M.K., Abou Hadi, A.F., Kadah M.S. (2011). Impacts of climate change on the widespread and epidemics of some tomato diseases during the last decade in Egypt. *Acta Horticulturae* 914, 317–320.
46. Fierer N., Wood S.A., Bueno de Mesquita C.P. (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. *Soil Biol. Biochem.* 153, 108111.
47. Fischer J., Beckers S.J., Yiamsawas D., Thines E., Landfester K., Wurm F.R. (2019). Targeted drug delivery in plants: enzyme-responsive lignin nanocarriers for the curative treatment of the worldwide grapevine trunk disease esca. *Adv Sci* 6, 1802315.
48. Fuentes S., Tongsonand E., Gonzalez Viejo C. (2021). How artificial intelligence (AI) is helping winegrowers to deal with adversity from climate change. *IVES Conference Series, Enoforum 2021.*
49. Furbank R.T., Tester M. (2011). Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in plant science* 16(12), 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.005> (pristupljeno - 03. lipnja 2023.).

50. García-Pedrajas M.D., Cañizares M.C., Sarmiento-Villamil J.L., Jacquat A.G., Dambolena J.S. (2019). Mycoviruses in Biological Control: From Basic Research to Field Implementation. *Phytopathology* 109, 1828–1839.
51. Gallai N., Salles J.M., Settele J., Vaissière B.E. (2009). Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol. Econ.* 68, 810–821.
52. Garrett K.A., Alcalá-Briseño R.I., Andersen K.F., Buddenhagen C.E., Choudhury R.A., Fulton J.C., Hernandez Nopsa J.F., Poudel R., Xing Y. (2018). Network Analysis: a Systems Framework to Address Grand Challenges in Plant Pathology. *Annual Review of Phytopathology* 56(1), 559-580.
53. Garret K.A., Bebbler D.P., Etherton B.A., Gold K.M., Plex Sulá A.I., Selvaraj M.G. (2022). Climate Change Effects on Pathogen Emergence: Artificial Intelligence to Translate Big Data for Mitigation. *Annual Review of Phytopathology* 60(1), 357-378.
54. Ghoneem K.M., Khalil A.A., Rashad E.M., Ahmed M.I.M., Mahmoud M.S.M. (2019). Granular Bioactive Formulation of *Trichoderma viride* and Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Biological Control of Cumin Wilt Disease. *Egyptian Journal of Phytopathology* 47(1), 175-197.
55. Giovani B., Blümel S., Lopian R., Teulon D., Bloem S., Galeano Martínez C., Beltrán Montoya C., Morales C.R.U., Dharmapuri S., Timote V., Horn N., Chouibani M., M'Élla J.G.M., Herrera V., Castinel A., Goletsos C., Moeller C., Naumann I., Stancanelli G., Bronzwaer S., Tramontini S., MacDonald P., Matheson L., Anthoine G., De Jonghe K., Schenk M., Steinmoller S., Rodriguez E., Cruz M.L., Luck J., Fraser G., Brunel S., Montuori M., Fedchock C., Steel E., Pennington H.G., Day R., Rossi J.P., Xia J. (2020). Science diplomacy for plant health. *Nature Plants* 6, 902–905.
56. Gospodarski list (2018). Utjecaj klimatskih promjena na poljoprivredu. Prilog broja 2. <https://gospodarski.hr/rubrike/ostalo/prilog-broja-utjecaj-klimatskih-promjena-na-poljoprivredu/> (pristupljeno 13. svibnja 2023.).
57. Goswami A., Roy I., Sengupta S., Debnath N. (2010). Novel applications of solid and liquid formulations of nanoparticles against insect pests and pathogens. *Thin Solid Films* 519(3), 1252–1257.
58. Goulson D., Nicholls E., Botías C., Rotheray E.L. (2015). Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347, 1255957.
59. Greiner S.D., Racca P., Jung J., von Tiedemann A. (2019). Determining and modelling the effective period of fungicides against *Septoria* leaf blotch in winter wheat. *Crop Protection* 117, 45–51.
60. Gullino M.L., Pugliese M., Gilardi G., Galibardi A. (2018). Effect of increased CO₂ and temperature on plant diseases: a critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. *J Plant Pathol* 100, 371–389. <https://doi.org/10.1007/s42161-018-0125-8> (pristupljeno 10. svibnja 2023.).
61. Hadwiger L.A. (2013). Plant science review: Multiple effects of chitosan on plant systems. *Solid science or hype Plant Sci* 208, 42-49.

62. Hagiwara H., Ezaki R., Hamada T., Tsuda M., Ebihara K. (2019). Development of a novel fungicide, tolprocarb. *Journal of pesticide science* 44(3), 208-213.
63. He D.C., Zhan J.S., Xie L.H. (2016). Problems, challenges and future of plant disease management: from an ecological point of view. *Journal of Integrative Agriculture* 15(4), 705-715.
64. He D.C., He M.H., Amalin D.M., Liu W., Alvindia D.G., Zhan J. (2021). Biological Control of Plant Diseases: An Evolutionary and Eco-Economic Consideration. *Pathogens* 10(10), 1311. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8541133/> (pristupljeno 23. lipnja 2023.).
65. Heinken A., Basile A., Hertel J., Thinne, C., Thiele I. (2021). Genome-scale metabolic modeling of the human microbiome in the era of personalized medicine. *Annu. Rev. Microbiol.* 75, 199–222.
66. Holden C. (2006). Report warns of looming pollination crisis in North America. *Science* 314, 397-397. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.314.5798.397#tab-citations> (pristupljeno - 27. svibnja 2023.).
67. IPPC Secretariat. (2021). Scientific review of the impact of climate change on plant pests – A global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. Rome. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. <https://www.fao.org/3/cb4769en/online/src/html/copyright.html> (pristupljeno 30. svibnja 2023.).
68. ISPM 20. (2019). Guidelines for a phytosanitary import regulatory system. <https://www.ippc.int/en/publications/guidelines-phytosanitary-import-regulatory-system/> (pristupljeno - 30. svibnja 2023.).
69. Ito H., Takada T., Morimoto M., Komai H., Kajino F., Ohara T., Tamagawa Y., Tsuda M., Banba S. (2023). Design and biological activity of a novel fungicide, quinofumelin. *Journal of pesticide science* 48(1), 22-27. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpestics/48/1/48_D22-042/_html/-char/ja (pristupljeno 17. svibnja 2023.).
70. Janda M., Lamparová L., Zubíková A., Burketová L., Martinec J., Krčková Z. (2019). Temporary heat stress suppresses PAMP-triggered immunity and resistance to bacteria in *Arabidopsis thaliana*. *Mol Plant Pathol* 20, 1005-1012.
71. Jeger M.J. (2004). Analysis of disease progress as a basis for evaluating disease management practices. *Annu Rev Phytopathol* 42, 61–82.
72. Jeger M. (2005). Disease in deciduous fruit production. *Fundamentals of temperate zone tree fruit production* 359–71.
73. Jeger M., Beresford R., Bock C., Brown N., Fox A., Newton A., Vicent A., Xu X., Yuen J. (2021). Global challenges facing plant pathology: multidisciplinary approaches to meet the food security and environmental challenges in the mid-twenty-first century. I. *CABI Agric Biosci* 2(20). <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00042-x> (pristupljeno - 07. svibnja 2023.).
74. Jamiołkowska A. (2020). Natural compounds as elicitors of plant resistance against diseases and new biocontrol strategies. *Agronomy* 10, 173.
75. Jones R.A., Barbetti M.J. (2012). Influence of climate change on plant disease infections and epidemics caused by viruses and bacteria. *CABI Rev* 7, 1-33.
76. Juroszek P., Racca P., Link S., Farhumand J., Kleinhenz B. (2020). Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology* 69, 179–193.

77. Kah M., Hofmann T. (2014). Nanopesticide research: Current trends and future priorities. *Environment International* 63, 224-235.
78. Kanwal S., Khan M.A., Saleem S., Tahir M.N., Muntaha S.T., Samreen T., Javed S., Nazir M.Z., Shahzad B. (2022). Integration of precision agriculture techniques for pest management. *Environmental Sciences Proceedings* 23(1), 19. <https://www.mdpi.com/2673-4931/23/1/19> (pristupljeno - 10. lipnja 2023.).
79. Kaur N., Devendran V. (2021). Plant leaf disease detection using ensemble classification and feature extraction. *Turk. J. Comput. Math. Educ.* 12, 2339–2352.
80. Khalifa M.E., MacDiarmid R.M.A. (2021). Mechanically Transmitted DNA Mycovirus Is Targeted by the Defence Machinery of Its Host, *Botrytis cinerea*. *Viruses* 13, 1315.
81. Khatabb A., Habib S.E.D., Ismail H., Zayan S., Fahmy Y., Khairy M.M. (2019). An IoT-based cognitive monitoring system for early plant disease forecast. *Computers and Electronics in Agriculture* 166, 105028.
82. Kim I.Y., Pusey P.L., Zhao Y., Korban S.S., Choi H., Kim K.K. (2012). Controlled release of *Pantoea agglomerans* e325 for biocontrol of fire blight disease of apple. *J. Control. Release* 161, 109–115.
83. Kumar P.L., Cuervo M., Kreuze J.F., Muller G., Kulkarni G., Kumari S.G., Massart S., Mezzalama M., Alakonya A., Muchugi A., Graziosi I., Ndjiondjop M.N., Sharma R., Negawo A.T. (2021). Phytosanitary Interventions for Safe Global Germplasm Exchange and the Prevention of Transboundary Pest Spread: The Role of CGIAR Germplasm Health Units. *Plants* 10(2), 328. <https://doi.org/10.3390/plants10020328> (pristupljeno - 27. svibnja 2023.).
84. Lagonenko L., Lagonenko A., Evtushenkov A. (2013). Impact of salicylic acid on biofilm formation by plant pathogenic bacteria. *J. Biol. Earth Sci.* 3, 176–181.
85. Lamsal K., Kim S.W., Jung J.H., Kim Y.S., Kim K.S., Lee Y.S. (2011). Inhibition Effects of Silver Nanoparticles against Powdery Mildews on Cucumber and Pumpkin. *Mycobiology* 39(1), 26–32.
86. Laurichesse S., Avérous L. (2014). Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. *Prog Polym Sci* 39, 1266-1290.
87. Le V.N.T., Ahderom S., Apopei B., Alameh K. (2020). A novel method for detecting morphologically similar crops and weeds based on the combination of contour masks and filtered local binary pattern operators. *Giga Science* 9(3), g1aa017.
88. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* 529, 84.
89. Li J., Wang N. (2014). Foliar application of biofilm formation-inhibiting compounds enhances control of citrus canker caused by *Xanthomonas citri* subsp. *citri*. *Phytopathol* 2, 134–142.
90. Li Z., Paul R., Ba Tis T., Saville A.C., Hansel J.C., Yu T., Ristaino J.B., Wei Q. (2019). Non-invasive plant disease diagnostics enabled by smartphone-based fingerprinting of leaf volatiles. *Nat. Plants* 5, 856–866. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0476-y> (pristupljeno - 22. lipnja 2023.).
91. Li M.C., Wu Q., Song K., Lee S., Qing Y., Wu Y. (2015). Cellulose nanoparticles: structure-morphology-rheology relationships. *ACS Sustain Chem Eng* 3, 821-832.
92. Li J., Wang C., Liang W., Liu S. (2021). Rhizosphere Microbiome: The Emerging Barrier in Plant-Pathogen Interactions. *Front. Microbiol* 12, 772420.

93. Liao, Y., Vemuri, V.R. (2002). Use of k-nearest neighbor classifier for intrusion detection. *Comput. Secur.* 21, 439–448. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016740480200514X> (pristupljeno - 20. lipnja 2023.).
94. Liu D., Sun J., Simmons B.A., Singh S. (2018). N-heterocyclic carbene promoted decarboxylation of lignin-derived aromatic acids. *ACS Sustain Chem Eng* 6, 7232-7238.
95. Liu Q., Pang Z., Liu Y., Fallah N., Hu C., Lin W., Yuan Z. (2023). Rhizosphere Fungal Dynamics in Sugarcane during Different Growth Stages. *International Journal of Molecular Sciences* 24(6), 5701. <https://doi.org/10.3390/ijms24065701> (pristupljeno - 14. lipnja 2023.).
96. Liu J., Wang X. (2021). Plant diseases and pests detection based on deep learning: A review. *Plant Methods* 17, 1–18.
97. Ma X., Wang X., Cheng J., Nie X., Yu X., Zhao Y., Wang W. (2015). Microencapsulation of *Bacillus subtilis* B99-2 and its biocontrol efficiency against *Rhizoctonia solani* in tomato. *Biol Control* 90, 34–41.
98. Machado T.O., Grabow J., Sayer C., de Araújo P.H.H., Ehrenhard M.L., Wurm F.R. (2022). Biopolymer-based nanocarriers for sustained release of agrochemicals: A review on materials and social science perspectives for a sustainable future of agri- and horticulture. *Advances in Colloid and Interface Science* 303, 102645.
99. Machado T.O., Beckers S.J., Fischer J., Sayer C., de Araújo P.H.H., Landfester K., Wurm F.R. (2021). Cellulose nanocarriers via miniemulsion allow Pathogen-Specific agrochemical delivery. *J Colloid Interface Sci* 601, 678-688.
100. Mahmood I., Imadi S.R., Shazadi K., Gul A., Hakeem K.R. (2016). Effects of pesticides on environment. *Plant, Soil and Microbes* 1, 253–269.
101. Mahlein A.K., Kuska M.T., Thomas S., Wahabzada M., Behmann J., Rascher U., Kersting K. (2019). Quantitative and qualitative phenotyping of disease resistance of crops by hyperspectral sensors: seamless interlocking of phytopathology, sensors, and machine learning is needed! *Current opinion in Plant biology* 50, 156-162.
102. McNish I.G., Smith K.P. (2022). Oat crown rust disease severity estimated at many time points using multispectral aerial photos. *Phytopathology* 112, 682–690.
103. Miew T.W., Misra K.K. (1994). Rice Seed Health Testing; IRRI, 122.
104. Mittler R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science* 11, 15–19.
105. Munkvold G.P., Gullino M.L. (2020). Seed and propagative material. Integrated pest and disease management in greenhouse crops, 331–354.
106. NDSU. North Dakota State University. (2020). Diseases in Drought Years <https://www.ndsu.edu/agriculture/ag-hub/ag-topics/crop-production/diseases-pests-and-weeds/plant-diseases/diseases-drought-years-07> (pristupljeno - 23. svibnja 2023.).
107. Newbery F., Qi A., Fitt B.D.L. (2016). Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications. *Curr. Opin. Plant. Biol.* 32, 101–109.
108. Noctor G., Mhamdi A. (2017). Climate change, CO₂, and defense: the metabolic, redox, and signaling perspectives. *Trends in Plant Science* 22, 857–870.
109. Nyholm L., Koziol A., Marcos S., Botnen A.B., Alberdi A. (2020). Holo-Omics: integrated host-microbiota multi-omics for basic and applied biological research. *iScience* 23, 101414. [https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042\(20\)30604-0.pdf](https://www.cell.com/iscience/pdf/S2589-0042(20)30604-0.pdf) (pristupljeno - 28. lipnja 2023.).

110. Ossowicki A., Tracanna V., Petrus M.L.C., van Wezel G., Raaijmakers J.M., Medema M.H., Garbeva P. (2020). Microbial and volatile profiling of soils suppressive to *Fusarium culmorum* of wheat. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 287, 20192527.
111. Pandit M.A., Kumar J., Gulati S., Bhandari N., Mehta P., Katyal R., Rawat C.D., Mishra V., Kaur J. (2022). Major Biological Control Strategies for Plant Pathogens. *Pathogens* 11(2), 273. <https://doi.org/10.3390/pathogens11020273> (pristupljeno - 23. lipnja 2023.).
112. Pantazi X.E., Moshou D., Tamouridou A.A. (2019). Automated leaf disease detection in different crop species through image features analysis and One Class Classifiers. *Comput. Electron. Agric.* 156, 96–104.
113. Parikka P., Hakal, K., Tiilikkala K. (2012). Expected shifts in *Fusarium* species' composition on cereal grain in Northern Europe due to climatic change. *Food Addit. Contam.* 29, 1543–1555.
114. Parisi C., Vigani M., Rodríguez-Cerezo E. (2015). Agricultural Nanotechnologies: What are the current possibilities? *Nano Today* 10, 124-127.
115. Paul R., Ostermann E., Gu Z., Ristaino J.B., Wei Q. (2020.) DNA extraction from plant leaves using a microneedle patch. *Curr. Protoc. Plant Biol.* 5, e20104.
116. Piao S., Liu Q., Chen A., Janssens I.A., Fu Y., Dai J., Liu L., Lian X., Shen M., Zhu X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global change biology* 25(6), 1922-1940.
117. Picault S., Huang Y.L., Sicard V., Arnoux S., Beaunée G., Ezanno P. (2019). EMULSION: Transparent and flexible multiscale stochastic models in human, animal and plant epidemiology. *PLoS Comput Biol* 15(9), e1007342. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007342> (pristupljeno - 17. lipnja 2023.).
118. Pitlik S.D., Koren O. (2017). How holobionts get sick—toward a unifying scheme of disease. *Microbiome* 5, 64.
119. Pomarici E., Vecchio R. (2019). Will sustainability shape the future wine market? *Wine Econ Policy* 8, 1-4.
120. Potts S.G., Biesmeijer J.C., Kremen C., Neumann P., Schweiger O., Kunin W.E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol Evol.* 25(6), 345–353.
121. Pour M.M., Saberi-Riseh R., Mohammadinejad R., Hosseini A. (2019). Investigating the formulation of alginate-gelatin encapsulated *Pseudomonas fluorescens* (vupf5 and t17-4 strains) for controlling *Fusarium solani* on potato. *Int. J. Biol. Macromol* 133, 603–613.
122. Prabha K. (2021). Disease sniffing robots to apps fixing plant diseases: applications of artificial intelligence in plant pathology—a mini review. *Indian Phytopathology* 74, 13–20. <https://doi.org/10.1007/s42360-020-00290-3> (pristupljeno - 02. lipnja 2023.).
123. ProMED, International society for infectious diseases. <https://promedmail.org/> (pristupljeno - 20. svibnja 2023.).
124. Pugnaire, F.I., Morillo, J.A., Peñuelas, J., Reich, P.B., Bardgett, R.D., Gaxiola, A., Wardle, D.A., van der Putten, W.H. (2019). Climate change effects on plant-soil feedbacks and consequences for biodiversity and functioning of terrestrial ecosystems. *Science advances* 5(11), eaaz1834. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1834> (pristupljeno - 24. svibnja 2023.).
125. Pusey P., Stockwell V., Reardon C., Smits T., Duffy B. (2011). Antibiosis activity of *Pantoea agglomerans* biocontrol strain e325 against *Erwinia amylovora* on apple flower stigmas. *Phytopathology* 101, 1234–1241.

126. Qi J., Song C.P., Wang B., Zhou J., Kangasjarvi J., Zhu J.K., Gong Z. (2018). Reactive oxygen species signaling and stomatal movement in plant responses to drought stress and pathogen attack. *Journal of Integrative Plant Biology* 60, 805–826.
127. Raaijmakers J.M., Mazzola M. (2016). Soil immune responses. *Science* 352, 1392-1393.
128. Rai M., Ingle A.(2012). Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology* 94(2), 287–293.
129. Rai A., Irulappan V., Muthapp S.K. (2021). Dry root rot of chickpea: a disease favored by drought. *Plant Dis.* 106(2), 346-356. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-21-1410-FE> (pristupljeno - 27. svibnja 2023.).
130. Raj S.N., Anooj E.S., Rajendran K., Vallinayagam S. (2021). A comprehensive review on regulatory invention of nano pesticides in Agricultural nano formulation and food system. *Journal of Molecular Structure* 1239, 130517.
131. Ramage G., Rajendran R., Sherry L., Williams C. (2012). Fungal biofilm resistance. *Int. J. Microbiol.* 528521.
132. Ramesh S., Hebbar R., Niveditha M., Pooja R., Shashank N., Vinod P.V. (2018). Plant disease detection using machine learning. *iProceedings of the International Conference on Design Innovations for 3Cs Compute Communicate Control (ICDI3C)*, 41-45.
133. Rangarajan A.K., Purushothaman R., Ramesh A. (2018). Tomato crop disease classification using pre-trained deep learning algorithm. *Proc. Comput. Sci.* 133, 1040–1047.
134. Raza M.M., Bebbler D.P. (2022). Climate change and plant pathogens. *Current Opinion in Microbiology* 70, 102233. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369527422001175?via%3Dihub> (pristupljeno - 25. rujna 2023.).
135. Richey B., Majumder S., Shirvaikar M., Kehtarnavaz N. (2020). Real-time detection of maize crop disease via a deep learning-based smartphone app. *Proceedings of the Real-Time Image Processing and Deep Learning* 11401, 11041A-2. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11401/114010A/Real-time-detection-of-maize-crop-disease-via-a-deep/10.1117/12.2557317.short?SSO=1> (pristupljeno - 21. lipnja 2023.).
136. Riseh R.S., Skorik Y.A., Thakur V.K., Pur M.M., Tamanadar E., Noghabi S.S. (2021). Encapsulation of Plant Biocontrol Bacteria with Alginate as a Main Polymer Material. *Int J Mol Sci.* 22(20), 11165.
137. Ristaino J.B., Anderson P.K., Bebbler D.P., Brauman K.A., Cunniffe N.J., Fedoroff N.V., Fingold C., Gilligan C.A., Jones C.M., Martin M.D., MacDonald G.K., Neenan P., Records A., Schmale D.G., Tateosian L., Wei Q. (2021). The persistent threat of emerging plant disease pandemics to global food security. *PNAS* 118(23), e2022239118.
138. Robert P.C. (2001). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. *Plant Nutrition*, 692- 693.
139. Rokach L., Maimon O. (2005). Decision Trees. *Data Mining and knowledge Discovery Handbook*, 165–192.
140. Sabry K., Ragaie M. (2018). Nanotechnology and their applications in insect's pest control. K.A. Abd-Elsalam & R. Prasad, eds. *Nanobiotechnology applications in plant protection*, 1–28.
141. Saharan V., Sharma G., Yadav M., Choudhary M.K., Sharma S.S., Pal A., Raliya R., Biswas P. (2015). Synthesis and in vitro antifungal efficacy of Cu-chitosan nanoparticles against pathogenic fungi of tomato. *Int J Biol Macromol* 75, 346-353.

142. Sagova-Mareckova M., Omelka M., Kopecky J. (2023). The Golden Goal of Soil Management: Disease-Suppressive Soils. *Key Discoveries* 113(4), 741-752.
143. Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N., Nelson A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol* 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y> (pristupljeno - 02. lipnja 2023.).
144. Scott N.R., Chen H., Cui H. (2018). Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. *J Agric Food Chem* 66, 6451-6456.
145. Shew A.M., Durand-Morat A., Nalley L.L., Zhou X.G., Rojas C., Thoma G. (2019). Warming increases 249 bacterial panicle blight (*Burkholderia glumae*) occurrences and impacts on USA 250 rice production. *PLoS One* 14, e0219199.
146. Siegel-Hertz K., Edel-Hermann V., Chapelle E., Terrat S., Raaijmakers J.M., Steinberg C. (2018). Comparative microbiome analysis of a Fusarium wilt suppressive soil and a Fusarium wilt conducive soil from the Châteaurenard region. *Front. Microbiol.* 9(1), 16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00568> (pristupljeno - 25. svibnja 2023.).
147. Singh V., Sharma N., Singh S. (2020). A review of imaging techniques for plant disease detection. *Artif. Intell. Agric.* 4, 229–242. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589721720300295> (pristupljeno - 20. lipnja 2023.).
148. Singh D., Singh S.K., Modi A., Singh P.K., Zhimo V.Y., Kumar A. (2020). Impacts of agrochemicals on soil microbiology and food quality. *Agrochemicals detection, treatment and remediation*, 101-116.
149. Singh B.K., Delgado-Baquerizo M., Egidi E., Guirado E., Leach J.E., Liu H., Trivedi P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nat Rev Microbiol.* 21, 640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7> (pristupljeno - 27. svibnja 2023.).
150. Sompura Y., Sharma V., Chayadevi H., Maruthi G.R., Banu J., Barupal T., Meena S.S. (2023). Efficacy of nanoparticles in plant disease control and their phytotoxicity . *Biomat. J.* 2(2), 1 – 15.
151. Song C., Zhu F., Carrión V.J. Cordovez V. (2020). Beyond Plant Microbiome Composition: Exploiting Microbial Functions and Plant Traits via Integrated Approaches. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8(896). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00896/full> (pristupljeno - 27. lipnja 2023.).
152. Tang Y., Chen C., Leite A.C., Xiong Y. (2023). Editorial: Precision control technology and application in agricultural pest and disease control. *Front. Plant Sci.* 14, 1163839. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1163839/full> (pristupljeno - 13. lipnja 2023.).
153. Thakur R., Verma S., Gupta S., Negi G., Bhardwaj P. (2022). Role of Soil Health in Plant Disease Management: A Review. *Agricultural Reviews* 43(1), 70-76.
154. The World Bank (2021). Climate smart agriculture. <https://www.worldbank.org/en/topic/climate-smart-agriculture> (pristupljeno 20. lipnja 2023.).
155. Thompson R.N., Gilliga, C.A., Cunniffe N.J. (2018). Control fast or control smart: when should invading pathogens be controlled? *PLoS Comput. Biol.* 14, e1006014.
156. Timmis K., Ramos J.L. (2021). The soil crisis: The need to treat as a global health problem and the pivotal role of microbes in prophylaxis and therapy. *Microb. Biotechnol.* 14, 769-797.
157. Tleuova A.B., Wielogorska E., Prasad Talluri V.S.S.L., Štěpánek F., Elliot C.T., Grigoriev D.O. (2020). Recent advances and remaining barriers to producing novel formulations of

- fungicides for safe and sustainable agriculture. *Journal of Controlled Release* 326, 468-481.
158. Tracanna V., Ossowicki A., Petrus M.L.C., Overduin S., Terlouw B.R., Lund G., Robinson S.L., Warris S., Schijlen E.G.W.M., van Wezel G.P., Raaijmakers J.M., Garbeva P., Medema M.H. (2021). Dissecting disease-suppressive rhizosphere microbiomes by functional amplicon sequencing and 10× metagenomics. *mSystems* 6(15). <https://doi.org/10.1128/mSystems.01116-20> (pristupljeno - 25. svibnja 2023.).
 159. Trivedi P., Batist, B.D., Bazany K.E., Singh B.K. (2022). Plant–microbiome interactions under a changing world: responses, consequences and perspectives. *N. Phytol.* 234, 1951–1959.
 160. Tu L., He Y., Yang H., Wu Z., Yi L. (2015). Preparation and characterization of alginate–gelatin microencapsulated bacillus subtilis sl-13 by emulsification/internal gelation. *J. Biomater. Sci. Polym* 26, 735–749.
 161. Turner J.A. (2018). *The Pesticide Manual*, 18th Edition (BCPC).
 162. Vaz S. (2019). *Sustainable Agrochemistry - A Compendium of Technologies*. Springer International Publishing.
 163. Velasquez A.C., Castroverde C.D.M., He S.Y. (2018). Plant–pathogen warfare under changing climate conditions. *Curr. Biol.* 28, 619–634.
 164. Vidal T., Boixel A.L., Maghrebi E., Perronne R., du Cheyron P., Enjalbert J., Leconte M., de Vallavieille-Pope C. (2022). Success and failure of invasive races of plant pathogens: The case of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in France. *Plant pathology* 71(7), 1525-1536.
 165. Villa F., Cappitelli F., Cortesi P., Kunova A. (2017). Fungal Biofilms: Targets for the Development of Novel Strategies in Plant Disease Management. *Front. Microbiol.* 8(654), 28450858.
 166. Vinceković M, Jalšenjak N, Topolovec-Pintarić S, Đermić E, Bujan M, Jurić S. (2016). Encapsulation of Biological and Chemical Agents for Plant Nutrition and Protection: Chitosan/Alginate Microcapsules Loaded with Copper Cations and *Trichoderma viride*. *J Agric Food Chem.* 64(43), 8073-8083.
 167. Vinceković M., Maslov Bandić L., Jurić S., Jalšenjak N., Čaić A., Živičnjak I., Đermić E., Karoglan M., Osrečak M., Topolovec-Pintarić S. (2019). The enhancement of bioactive potential in *Vitis vinifera* leaves by application of microspheres loaded with biological and chemical agents. *J. Plant Nutr.* 42:543–558.
 168. Wang X., Wei Z., Yang K., Wang J., Jousset A., Xu, Y., Shen Q., Friman V.P. (2019). Phage combination therapies for bacterial wilt disease in tomato. *Nat. Biotechnol.* 37, 1513–1520. <https://www.nature.com/articles/s41587-019-0328-3> (pristupljeno - 27. lipnja 2023.).
 169. Wegulo S., Giesler L., Harveson R., Jackson-Ziems T.A., Liu B. (2013). Impacts of Drought on Disease Development and Management. *Plant Pathology Papers* 537, 125-127.
 170. Williams A., Pétriacq P., Schwarzenbacher R.E., Beerlin, D.J. Ton J. (2018). Mechanisms of glacial-to-future atmospheric CO₂ effects on plant immunity. *New Phytologist* 218, 752–761.
 171. Willocquet L., Savary S., Yuen J. (2017). Multiscale Phenotyping and Decision Strategies in Breeding for Resistance. *Trends Plant Sci* 22(5), 420-432.
 172. Wiwattanapatapee R., Chumthong A., Pengnoo A. (2013). Preparation and evaluation of *Bacillus megaterium*-alginate microcapsules for control of rice sheath blight disease. *World J Microbiol Biotechnol* 29, 1487–1497. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1314-4> (pristupljeno - 28. svibnja 2023.).

173. Xiong W., Song Y., Yan, K., Gu Y., Wei Z., Kowalchuk G.A. (2020). Rhizosphere protists are key determinants of plant health. *Microbiome* 8(27). <https://link.springer.com/article/10.1186/s40168-020-00799-9> (pristupljeno - 27. lipnja 2023.).
174. Xu H., Xia A., Wang D., Zhang Y., Deng S., Lu W., Luo J., Zgong Q., Zhang F., Zhou L., Zhang W., Wang Y., Yang C., Chang K., Fu W., Cui J., Gan M., Luo D., Chen M. (2020). An ultraportable and versatile point-of-care DNA testing platform. *Sci. Adv.* 6(17), eaaz7445. DOI: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aaz7445> (pristupljeno - 23. lipnja 2023.).
175. Xu N., Yang Q., Yang X., Wang M., Guo M. (2021). Reconstruction and analysis of a genome-scale metabolic model for *Agrobacterium tumefaciens*. *Mol. Plant Pathol.* 22, 348–360.
176. Xu L., Pierroz G., Wipf H.M.L., Gao C., Taylor J.W., Lemaux P.G. (2021). Holo-omics for deciphering plant-microbiome interactions. *Microbiome* 9(69). <https://microbiomejournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40168-021-01014-z> (pristupljeno 28. lipnja 2023.).
177. Yang L.N., Ren M., Zhan J. (2022). Modeling plant diseases under climate change: evolutionary perspectives. *Opinion* 28(5), 519.526. [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(22\)00334-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS136013852200334X%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(22)00334-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS136013852200334X%3Fshowall%3Dtrue) (pristupljeno - 25. rujna 2023.).
178. Zarco-Tejada P.J., Poblete T., Camino C., Dugo V.G., Calderon R., Hornero A., Hernandez-Clemente R., Roman-Ecija M., Velasco-Amo M.P., Landa B.B., Beck P.S.A., Saponari M., Boscia D., Navas-Cortes J.A. (2021). Divergent abiotic spectral pathways unravel pathogen stress signals across species. *Nat Commun* 12, 6088. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26335-3> (pristupljeno - 22. lipnja 2023.).
179. Zhang S., Li X., Sun Z., Shao S., Hu L., Ye M., Zhou Y., Xia X., Yu J., Shi K. (2015). Antagonism between phytohormone signaling underlies the variation in disease susceptibility of tomato plants under elevated CO₂. *Journal of Experimental Botany* 66, 1951–1963.
180. Zhang Y., Song C., Zhang D. (2020). Deep Learning-based Object Detection Improvement for Tomato Disease. *IEEE Access* 8, 56607–56614. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9044330> (pristupljeno - 20. lipnja 2023.).
181. Zhao X., Cui H., Wang Y., Sun C., Cui B., Zeng Z. (2018). Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 66(26), 6504–6512.
182. Zhao W., Liu Y., Zhang P., Zhou P., Wu Z., Lou B., Jiang Y., Shakoore N., Li M., Li Y., Lynch I., Rui Y., Tan Z. (2022). Engineered Zn-based nano-pesticides as an opportunity for treatment of phytopathogens in agriculture. *NanoImpact* 28, 100420.
183. Zhao J., Liu D., Huang R. (2023). A Review of Climate-Smart Agriculture: Recent Advancements, Challenges, and Future Directions. *Sustainability* 15(4), 3404. <https://doi.org/10.3390/su15043404> (pristupljeno - 27. lipnja 2023.).
184. Zikankuba V.L., Mwanyika G., Ntwenya J.E., James A. (2019). Pesticide regulations and their malpractice implications on food and environment safety. *Cogent Food Agric.* 5, 1601544.

Životopis

Lucija Pejaković, rođena 2. svibnja 1998. godine u Sisku, do 2020. godine živjela je u mjestu Križ Hrastovački, selu nedaleko grada Petrinje i iste godine se preselila u Sisak. Osnovnoškolsko obrazovanje završila je u Prvoj osnovnoj školi Petrinja. Godine 2013. upisuje Srednju školu Petrinja, smjer „Veterinarski tehničar“ koju je pohađala od 2013. do 2017. godine. U srednjoj školi volontirala je s grupom za biblioterapiju i sudjelovala u radu dramske skupine. Radila je u tvrtki Gavrilović 2018. godine kao radnik u proizvodnji prije upisa na fakultet, a tijekom studiranja radila je u tvrtkama Kaufland i Sinsay. Kako je odrasla na selu okružena poljoprivredom i kao ljubitelj prirode, 2018. godine upisuje Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, smjer „Fitomedicina“. Titulu *univ. bacc. ing. agr.* stječe 2021. godine obranom završnog rada naslova: „Novootkriveni virusi vinove loze“ pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Darka Vončine. Iste godine upisuje diplomski studij „Fitomedicina“ na Agronomskom fakultetu. U akademskoj godini 2022./2023. izrađuje diplomski rad pod mentorstvom prof. dr. sc. Edyte Đermić. Njena znanja i vještine su timski rad, dobro poznavanje engleskog jezika, kako u govoru tako i u pisanju, te informatičko znanje (MS Office, MS Word, MS PowerPoint i dr.) Lucija je tijekom odrastanja trenirala nogomet, a hobi joj je bilo crtanje. Slobodno vrijeme voli provoditi sa svojim zaručnikom, sestrama i roditeljima.

OBRAZOVANJE: - Srednja škola Petrinja, Veterinarski tehničar
2013.-2017.
- Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Fitomedicina (BS i MS)
2018.-2023.

RADNO ISKUSTVO: - Gavrilović d.o.o., radnik u proizvodnji
- Kaufland, blagajnik
- Sinsay, pomoćni poslovi u trgovini

EUROPASS CV: <https://europa.eu/europass/eportfolio/api/eprofile/shared-profile/lucija-pejakovi%C4%87/093555e7-1d63-4af2-89af-1f41c45d7f57?view=html>